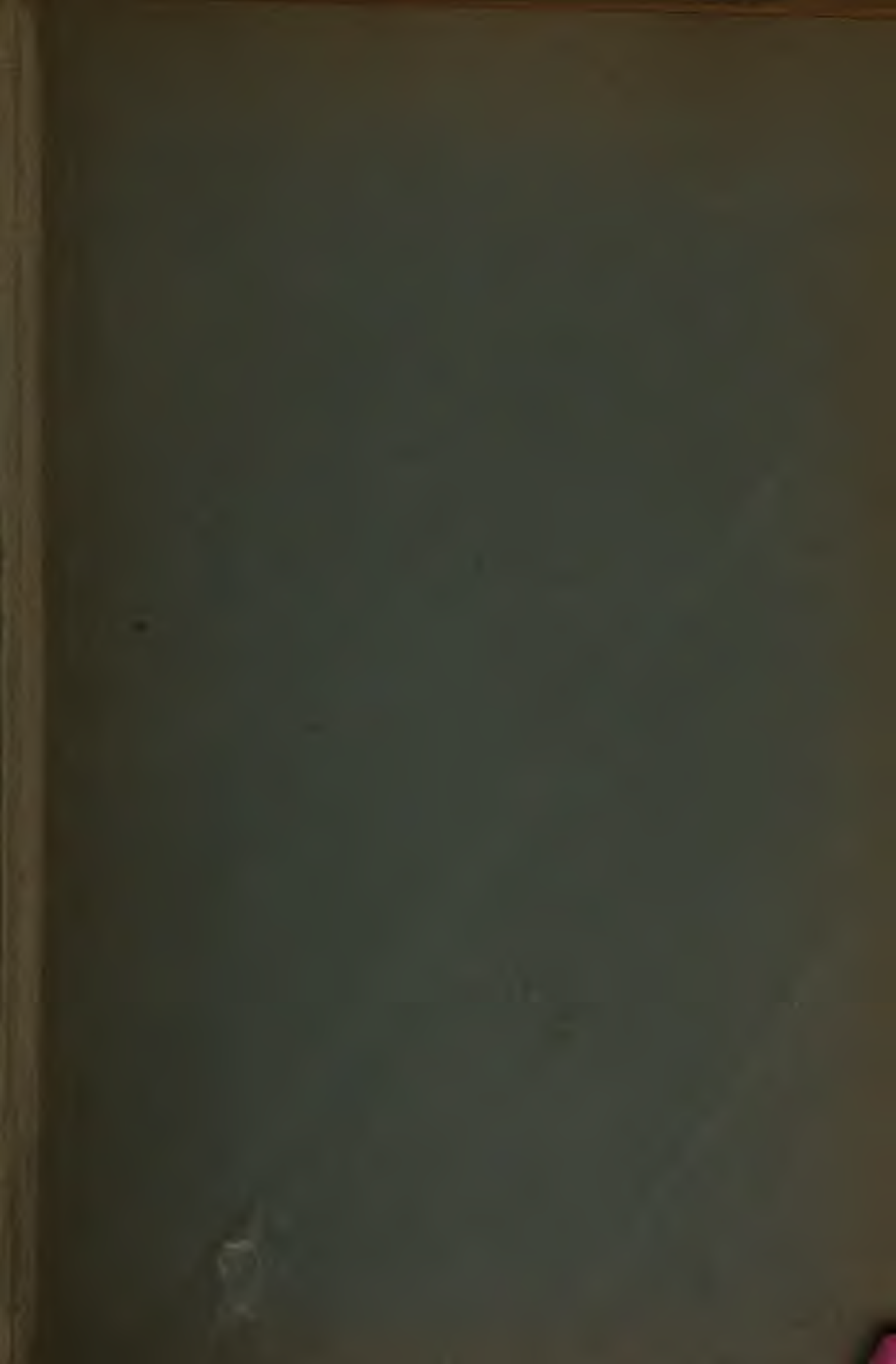


CHA

ES



CIMENTS

ET

CHAUX HYDRAULIQUES

CIMENTS

ET

CHAUX HYDRAULIQUES

FABRICATION — PROPRIÉTÉS — EMPLOI

PAR

E. CANDLOT

DEUXIÈME ÉDITION

Revue et considérablement augmentée

PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET Cie, ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

—

1898

AVERTISSEMENT

L'accueil bienveillant fait à la première édition de notre ouvrage sur les chaux et les ciments nous a engagé à présenter cette fois un exposé plus complet de la fabrication des produits hydrauliques. Depuis quelques années, beaucoup d'usines ont été créées et des progrès très importants ont été réalisés ; nous nous sommes efforcés de donner à tous ceux qui s'intéressent aux chaux et aux ciments des notions générales assez précises et de montrer l'état actuel de cette industrie aux points de vue de ses perfectionnements et de son développement.

Sans nous arrêter aux procédés surannés qui ne présentent plus qu'un intérêt rétrospectif, sans vouloir décrire tous les appareils qui sont inventés tous les jours et dont beaucoup ne sont même pas essayés sérieusement, nous nous sommes contentés de faire connaître les procédés de fabrication les plus communément employés, et parmi les inventions récentes nous avons choisi celles qui présentent un caractère original et qui paraissent destinées à donner des résultats pratiques.

Peut-être trouvera-t-on que nous nous sommes bornés à de simples descriptions sans donner d'appréciation sur la valeur des divers systèmes ; mais comment pourrait-on dire qu'il faut choisir tel ou tel appareil, quand ce choix est subordonné, la plupart du temps, à des circonstances locales ou particulières ? De même, nous n'avons pas voulu indiquer de prix de revient, ces prix étant très variables avec les régions, les moyens de transports, etc.

Nous avons dû également développer davantage le chapitre

consacré aux essais des chaux et des ciments. La commission des méthodes d'essais a fixé des règles à suivre et nous ne pouvions mieux faire que de reproduire ses prescriptions pour les principaux essais qui doivent être connus de tous ceux qui s'occupent des produits hydrauliques.

Malgré tous nos efforts pour arriver à présenter un ouvrage plus complet, nous n'ignorons pas combien nous avons encore besoin de l'indulgence des lecteurs. Les encouragements que nous avons reçus nous font espérer que l'on voudra bien tenir compte de toute notre bonne volonté et de notre désir de faire une œuvre utile.

E. Candlot.

ERRATA

—

Page	*Ligne*	*Au lieu de*	*Lire*
142	35	410.000	407.000
153	13	J. Grandchamp et J. Roche	de Granchamp et de Roche

FABRICATION, PROPRIÉTÉS ET EMPLOIS

DES

CIMENTS

ET DES

CHAUX HYDRAULIQUES

CHAPITRE PREMIER

—

CHAUX HYDRAULIQUES

1. Historique. — Avant les découvertes de Vicat on ne connaissait guère, comme mortiers hydrauliques, que les mélanges de chaux grasse et de Pouzzolane, mortiers employés principalement en Italie et dans le midi de la France. On avait bien constaté que certaines chaux donnaient des résultats plus satisfaisants et qu'elles avaient la faculté de durcir sous l'eau ; mais ce fait, dont on ne tirait pas d'ailleurs grand parti, ne recevait pas d'explication sérieuse. C'est ainsi qu'en 1756 John Smeaton signala les propriétés hydrauliques de la chaux employée à la construction du phare d'Eddystone. Guyton de Morveau et Saussure s'occupèrent de la question des chaux hydrauliques, mais leurs recherches restèrent infructueuses.

La première observation sérieuse fut faite en 1813 par Collet-Descotils, professeur de chimie à l'Ecole des Mines ; il fit remarquer que la silice contenue dans les calcaires, qui est insoluble dans les acides, devient soluble quand le calcaire est porté à une température suffisante. Il en déduisait que la silice se combinait à la chaux pendant la cuisson et que c'était à ce fait qu'il fallait attribuer les propriétés hydrauliques de certaines chaux.

Mais ce fut Vicat qui, le premier, se livra à des études approfondies sur les mortiers hydrauliques. Après de nombreuses expériences, il établit d'une manière irréfutable que la prise du mortier et son durcissement étaient déterminés par la combinaison de la silice avec la chaux.

On peut, dit M. Morceron-Vicat, résumer les travaux de Vicat dans cette loi fondamentale : Pour qu'un calcaire donne, par la cuisson, une chaux hydraulique, il faut et il suffit qu'il contienne une certaine quantité d'argile disséminée dans sa masse d'une manière intime.

Le fer, le manganèse, la magnésie, ne sont pas des éléments de l'hydraulicité. Chacun de ces corps peut manquer dans un calcaire sans lui rien enlever de sa valeur au point de vue hydraulique. L'alumine même peut disparaître ; mais, s'il n'en reste aucune trace, le durcissement de la chaux marche moins rapidement.

L'élément essentiel de l'hydraulicité c'est la silice.

On peut toujours fabriquer des chaux hydrauliques en mélangeant une argile quelconque avec de la chaux grasse ou du carbonate de chaux dans une proportion déterminée et en faisant cuire le mélange comme un calcaire ordinaire.

Vicat ne se contenta pas de démontrer, par des expériences de laboratoire, à quelle cause il fallait attribuer l'hydraulicité de certaines chaux, il sut tirer de sa découverte, et ce n'est pas là son moindre titre de gloire, des résultats pratiques dont les conséquences ne tardèrent pas à se manifester. C'est ainsi qu'après avoir examiné de nombreux gisements de calcaire, il fit constater qu'il était possible de produire de grandes quantités de chaux possédant des propriétés hydrauliques. L'industrie mit à profit ses indications et bientôt un certain nombre d'usines fut en mesure de livrer des chaux qui remplacèrent avantageusement les mortiers de chaux grasse et de pouzzolane. On put réduire dans de grandes proportions les dépenses considérables nécessitées auparavant par les travaux hydrauliques et beaucoup d'ouvrages, impossibles jusqu'alors à entreprendre, devinrent d'une exécution facile.

Loin d'envelopper sa découverte dans des formules abstraites, dit en-

core M. Merceron-Vicat, Vicat la fit connaître sous une forme éminemment pratique, parce que préférant, suivant l'expression de Thénard, « la gloire d'être utile à celle d'être riche » et préoccupé avant tout, en sa qualité d'Ingénieur, de faire progresser l'art des constructious, il voulait donner un moyen pratique de fabriquer ses chaux hydrauliques à tous les constructeurs et partout... Le but qu'il s'était proposé fut atteint si rapidement qu'en 1845 Arago pouvait dire, sans être taxé d'exagération : « on citerait difficilement une découverte qui, dans le court espace de 26 années, ait eu de si colossales applications et de si utiles résultats ». L'opinion de nos constructeurs et de nos plus célèbres chimistes sur l'immensité des services rendus par cette découverte, a été unanime. Il suffit, pour le justifier, de dire qu'en 1845. moins de 20 ans après sa publication, des relevés authentiques portaient déjà à près de 200 millions le chiffre des économies réalisées par l'emploi des mortiers hydrauliques dans les constructions dépendant des services des ponts et chaussées et de la guerre. Si l'on considérait maintenant (1856) l'impulsion donnée aux travaux d'art depuis cette époque, il faudrait probablement quintupler ce chiffre qui dans la suite ne s'évaluera que par milliards.

Les travaux de Vicat datent de 1812, mais ce n'est qu'en 1818 qu'il fit connaître les premiers résultats de ses recherches. Celles-ci portèrent principalement sur les chaux hydrauliques et les pouzzolanes. Comme nous l'avons dit précédemment, il démontra que tout calcaire contenant une certaine proportion d'argile intimement disséminée dans sa masse était susceptible de donner après cuisson une chaux hydraulique. Il expliquait ainsi les modifications que subit un calcaire quand il est porté à une température suffisante et les causes qui déterminent la prise et le durcissement : pendant la cuisson, la chaux réagit sur l'argile, elle se combine à la silice pour former un silicate de chaux ; ce sel, en s'hydratant, est l'agent essentiel de la consolidation, l'alumine et le restant de la silice constituent un silicate d'alumine qui s'hydrate également ; la présence de l'alumine accélère le durcissement, mais elle ne paraît pas nécessaire à la production d'une chaux hydraulique de bonne qualité.

Selon que la quantité d'argile contenue dans un calcaire est plus ou moins grande, la chaux produite possède des qualités

hydrauliques différentes. C'est ainsi que Vicat a classé les chaux en chaux faiblement et moyennement hydrauliques, chaux hydrauliques proprement dites et chaux éminemment hydrauliques. Chaque classe de chaux est caractérisée par le temps de prise et aussi par l'indice d'hydraulicité, c'est-à-dire par le rapport de la silice et de l'alumine à la chaux.

Les chaux faiblement hydrauliques sont celles dont l'indice est compris entre 0,10 et 0,16 ; la quantité d'argile contenue dans le calcaire varie de 5,3 à 8,2 % ; ces chaux font prise du seizième au trentième jour. Les calcaires à chaux moyennement hydrauliques contiennent 8,2 à 14,8 % d'argile ; l'indice est compris entre 0,16 et 0,31, la prise a lieu du dixième au quinzième jour. Les chaux hydrauliques proprement dites ont un indice compris entre 0,31 et 0,42 ; elles proviennent de la cuisson des calcaires contenant 14,8 à 19,1 % d'argile ; la prise se produit du cinquième au neuvième jour ; enfin les calcaires à chaux éminemment hydrauliques contiennent de 19,1 à 21,8 % d'argile ; l'indice varie de 0,42 à 0,50 ; la prise se manifeste du deuxième au quatrième jour.

Au delà de ces proportions d'argile les calcaires fournissent des chaux limites ou des ciments à prise lente quand la proportion d'argile varie de 21,8 à 26,7, ce qui donne un indice d'hydraulicité de 0,50 à 0,65 ; puis, quand l'indice atteint 0,65 à 1,20, on a des ciments à prise rapide : les calcaires contiennent 26,7 a 40 % d'argile (1).

Cette classification n'a rien d'absolu, car, s'il est nécessaire qu'un calcaire contienne une certaine proportion d'argile pour produire une chaux hydraulique déterminée, il faut encore que la fabrication soit conduite de manière que ses propriétés hydrauliques soient entièrement développées. Il faut remarquer également que les gisements de calcaire n'étant pas absolument réguliers, on met presque toujours dans un même four des calcaires d'indices différents, et que le produit final est un mélange de chaux à divers degrés d'hydraulicité.

(1) Voir sur ce sujet la *Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur*, de M. Durand-Claye. Inspecteur-général des Ponts-et-Chaussées. Baudry et Cie, éditeurs, 1885, 2e édition, 1897.

En pratique, on n'emploie guère, pour les travaux de quelque importance, que les chaux moyennement hydrauliques, les chaux hydrauliques proprement dites et les chaux éminemment hydrauliques ; encore ces dernières sont-elles assez rares car on rencontre peu de chaux dont l'indice soit supérieur à 0,42.

On désigne assez souvent sous le nom de chaux éminemment hydrauliques des chaux dont l'indice est inférieur à 0,42 mais qui font prise en moins de deux jours, comme la chaux du Teil par exemple.

Non seulement Vicat détermina d'une manière précise les conditions de production d'une chaux hydraulique, mais il indiqua également qu'en mélangeant, dans des proportions convenables, de l'argile et du carbonate de chaux, on obtenait, après cuisson, une chaux possédant au même degré les propriétés hydrauliques des chaux naturelles les plus énergiques. Il devenait possible, par conséquent, de fabriquer presque partout de la chaux hydraulique. Mais on ne tarda pas à découvrir un grand nombre de gisements de calcaires contenant une dose d'argile convenable pour donner des produits hydrauliques de bonne qualité et la fabrication artificielle ne prit pas beaucoup d'extension ; aujourd'hui elle a presque complètement disparu.

Les recherches statistiques de Vicat sur les substances calcaires à chaux hydraulique et à ciment naturel, commencées en 1824, ont été publiées en 1853 (1). Nous trouvons dans l'avertissement qui précède les résultats de ces recherches les renseignements suivants :

.... On trouvera dans la collection suivante, qui comprend 76 départements, la composition approximative des calcaires, tantôt à jour, tantôt en sous-sol, qui en forment la surface ; on y remarquera plus de 900 indications de carrières, propres à fournir de pierres à chaux hydrauliques et à ciments, avec la désignation des formations auxquelles elles appartiennent. L'impulsion donnée par ce premier travail, que l'on ne doit considérer que comme une suite de jalons posés pour des recherches ultérieures plus multipliées, cette impulsion a produit d'immenses résul–

(1) Chez Carilian-Gœury et V. Dalmont, quai des Augustins, 49, Paris.

tats ; les exploitations de chaux hydrauliques et de ciment ont pris un développement inattendu : il en est résulté une véritable révolution dans l'art de bâtir, et si nos grands travaux d'art en tous genres s'élèvent et se consolident aujourd'hui avec une célérité et une économie inconnues à nos devanciers, c'est incontestablement parce que les recherches de M. Vicat ont révélé au pays toutes ces richesses dont jusqu'alors il n'avait pas soupçonné l'existence.

On a reconnu toutefois, depuis cette époque, que la fabrication de la chaux hydraulique, très simple en apparence, demandait des précautions minutieuses, principalement quand le gisement n'est pas suffisamment régulier. Aussi, beaucoup d'exploitations qui avaient été commencées à la suite des recherches de Vicat ont dû être abandonnées, et le nombre des usines qui produisent des chaux hydrauliques de bonne qualité est relativement assez réduit.

2. Fabrication. — *Chaux hydraulique artificielle.* — La fabrication de la chaux hydraulique artificielle est aujourd'hui très restreinte ; l'usine des Moulineaux, près de Paris, créée en 1826 par MM. Brillant et de Saint-Léger est à peu près la seule qui existe maintenant ; elle produit 15 000 à 20 000 tonnes par an et appartient à M. Fauh. Cette chaux hydraulique est produite par le mélange de craie pure et d'argile ; la craie s'extrait en galeries ; on la mélange avec l'argile dans des malaxeurs verticaux analogues à ceux qui sont employés pour la fabrication du mortier. La proportion est de une partie d'argile pour cinq de craie. Le mélange sort des malaxeurs à l'état de pâte ferme ; on découpe cette pâte en pains de grosseur régulière et ceux-ci sont séchés sur les fours mêmes dans lesquels s'opère la cuisson. Ces fours sont analogues à ceux que l'on trouve dans presque toutes les usines à chaux et que nous décrirons à propos des chaux naturelles ; ce sont des fours coulants ou continus.

L'extinction, le blutage, la séparation et la mouture des grappiers ne présentent rien de particulier et s'opèrent de la même façon que pour les chaux naturelles.

Chaux hydrauliques naturelles. — La fabrication de la chaux hydraulique comprend : l'extraction du calcaire, la cuisson, l'extinction, le blutage, l'ensachage.

Extraction. — Les carrières exploitées par les usines de chaux hydraulique appartiennent en général au terrain oxfordien ou néocomien. Les calcaires se présentent tantôt en bancs puissants et assez homogènes comme au Teil, et plus généralement en couches nombreuses d'épaisseur et de composition variables.

Un gisement de calcaire à chaux hydraulique n'est généralement pas absolument régulier et l'on doit, par des analyses fréquentes, reconnaître quelles sont les parties susceptibles de donner un produit de bonne qualité et celles qui doivent être rejetées.

Au sujet de la valeur du gisement, M. Bonnami s'exprime ainsi :

Tous ceux qui se sont occupés de la valeur des gisements ont reconnu le peu de consistance de la composition, dans le sens vertical notamment, même en l'absence de toute stratification. Des parties très voisines peuvent être identiques au point de vue du faciès et différer sensiblement par la composition ; cependant il faut observer que la partie la plus argileuse est généralement la plus onctueuse au toucher. La valeur du gisement sera donc déterminée par une suite d'analyses effectuées sur des échantillons prélevés judicieusement en un grand nombre de points du front de taille (1).

Le calcaire est le plus souvent extrait à la mine qui donne de gros blocs débités ensuite en fragments aussi réguliers que possible. L'exploitation se fait tantôt à ciel ouvert comme au Teil, tantôt en galeries comme à Paviers. Au Teil on a employé des mines dont la charge atteignait 10 000 à 12 000 kilogrammes de poudre; on produit ainsi un abattage considérable qui a pour but de mélanger ensemble les différents bancs et d'augmenter par ce fait l'homogénéité du produit.

Quand la disposition du terrain le permet, le sol de la carrière se trouve au niveau du gueulard des fours ; la pierre est

(1) *Fabrication et contrôle des chaux hydrauliques et des ciments*, par U. Bonnami Gauthier-Villars et fils, Paris 1888.

ainsi transportée aux fours avec le moins de frais possible. Il importe, en effet, quand il s'agit d'installations telles que les fabriques de chaux dans lesquelles la quantité de matière à mettre en œuvre est considérable, de tenir compte de toutes les circonstances, qui peuvent diminuer les frais de manipulation : c'est ainsi que l'on doit éviter les reprises, les transports inutiles, etc... M. Bonnami, dans son étude sur les chaux hydrauliques, donne la coupe théorique d'une fabrique de chaux. Les fours se trouvent immédiatement au-dessous de la carrière, à quelque distance de l'orifice inférieur des fours, et un peu en contre-bas sont placées les chambres d'extinction; à l'extrémité de celles-ci la chaux tombe dans les bluteries à la sortie desquelles elle est reçue dans des sacs et transportée au magasin. Ces dispositions ne peuvent être utilisées que très rarement, quand le terrain s'y prête ; quelques usines les réalisent en partie.

Cuisson. — Les systèmes de fours dans lesquels s'effectue la cuisson des chaux hydrauliques sont très nombreux et très variés. On peut les diviser en deux catégories : les fours à longue flamme et les fours à courte flamme. Dans les premiers, le foyer est placé en dehors du four, ou du moins de la partie du four dans laquelle s'opère la cuisson; les matières à cuire ne se trouvent pas en contact avec le combustible. On se sert de combustible gazeux produisant une longue flamme.

Les figures 1, 2 et 3 indiquent quelques dispositions de fours à longue flamme ou à gazogène employés en Allemagne.

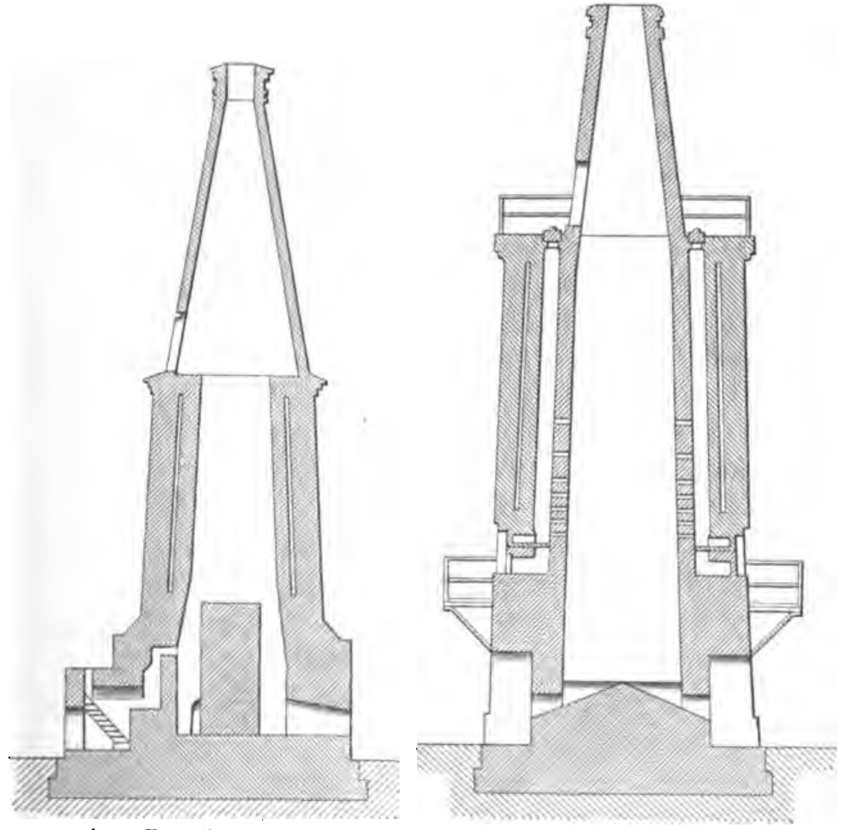
Le four Fanehjelm (*fig.* 1) est cylindrique, il a 12 mètres de hauteur environ, et il est surmonté d'une cheminée en forme de tronc de cône; la pierre à chaux est introduite par une porte pratiquée dans cette cheminée.

Des gazogènes situés à la partie inférieure du four produisent du gaz qui est envoyé dans le four par une série d'ouvertures disposées convenablement. L'air nécessaire à la combustion est introduit par les portes de défournement qui sont munies de registres et, passant sur de la chaux cuite, il arrive très chaud dans la zone de cuisson.

L'extraction de la chaux se fait toutes les deux heures.

Un des avantages de ce four est que les gazogènes permettent d'employer du combustible à bon marché ; il faut 20 à 28 kilogrammes de houille pour 100 kilogrammes de chaux cuite. La production d'un four atteint, suivant sa grandeur, 10 000 à 30 000 kilogrammes par 24 heures.

Le four système Paar (*fig.* 2) ressemble beaucoup au précédent ; l'introduction du combustible dans les gazogènes se fait

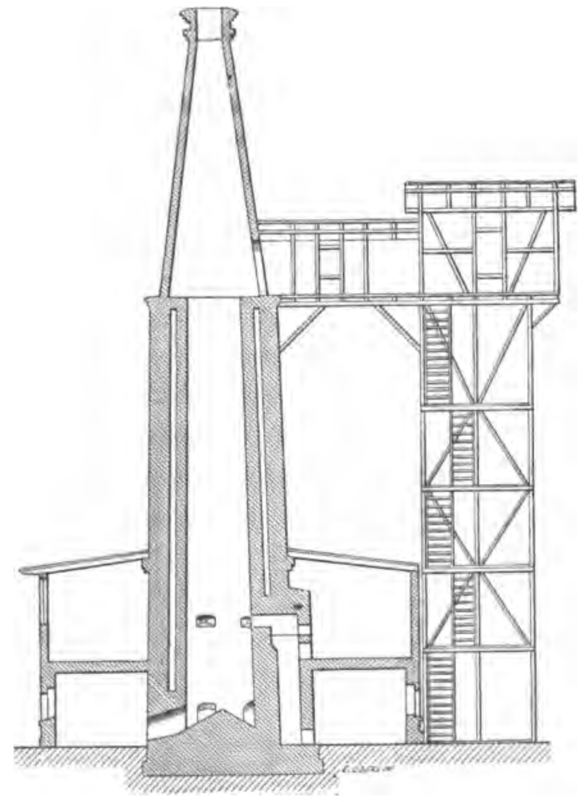


1. — Four Fahnehjelm. 2. — Four Paar.

par des conduits placés dans le massif du four et venant s'ouvrir à la partie supérieure. Le fonctionnement du four, ses dimensions, le rendement, etc... sont à peu près les mêmes que dans le four Fahnehjelm.

Le four de Rüdersdorf (*fig.* 3) se distingue des deux autres fours dont nous venons de parler en ce que les gazogènes sont

remplacés par des grilles sur lesquelles on brûle du charbon gras à longue flamme. Au lieu de grilles planes, on peut disposer



3. — Four de Rüdersdorf.

des foyers à alimentation continue ce qui permet de brûler des combustibles de qualité inférieure. Suivant la dimension du four, le rendement est de 5 à 13 000 kilogrammes en 24 heures; la hauteur du four est généralement de 10 mètres. La quantité de houille employée pour la cuisson varie de 25 à 35 kilogrammes par 100 kilogrammes de chaux cuite.

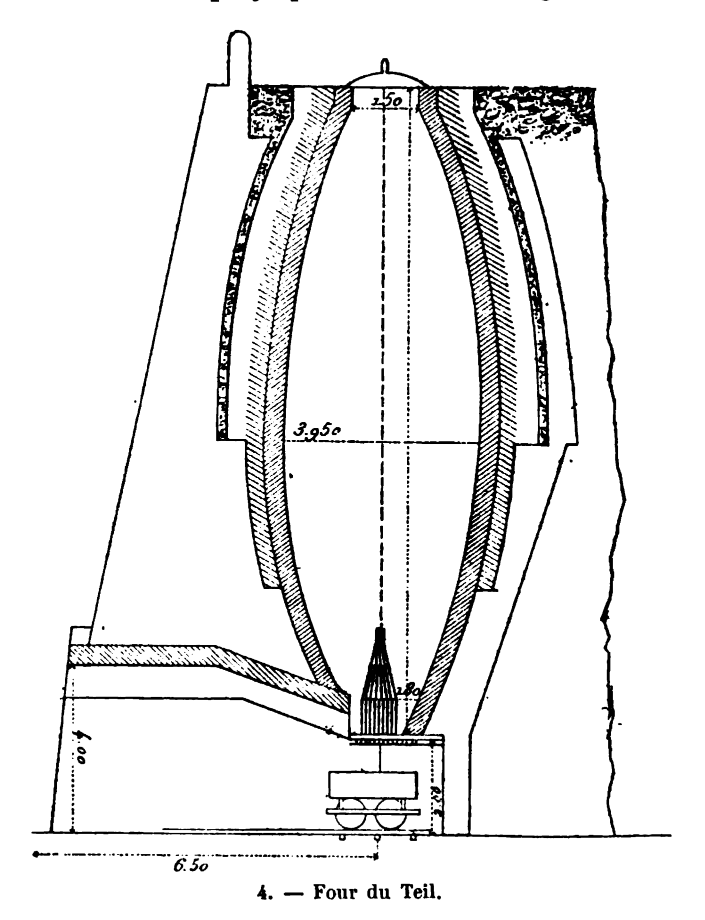
Les fours continus à courte flamme sont d'un emploi beaucoup plus général que les fours à longue flamme; ils donnent de meilleurs résultats, au point de vue de l'uniformité de la cuisson et de l'économie de combustible.

Ces fours ont une forme ovoïde, leur hauteur est assez variable; dans certaines usines, elle n'est que de 7 à 8 mètres, dans

d'autres, elle atteint parfois 12m,50 à 13 mètres. Au Teil, les fours les plus récents ont 13 mètres de hauteur, le diamètre au gueulard est de 1 mètre à 1m,50, au ventre de 3m,50 à 4 mètres, et à la grille de 1m,50 à 2 mètres, (*fig.* 4.)

La capacité des fours est de 75 mètres cubes. Chaque four produit 18 tonnes de chaux par 24 heures.

Le combustible employé pour la cuisson est généralement de

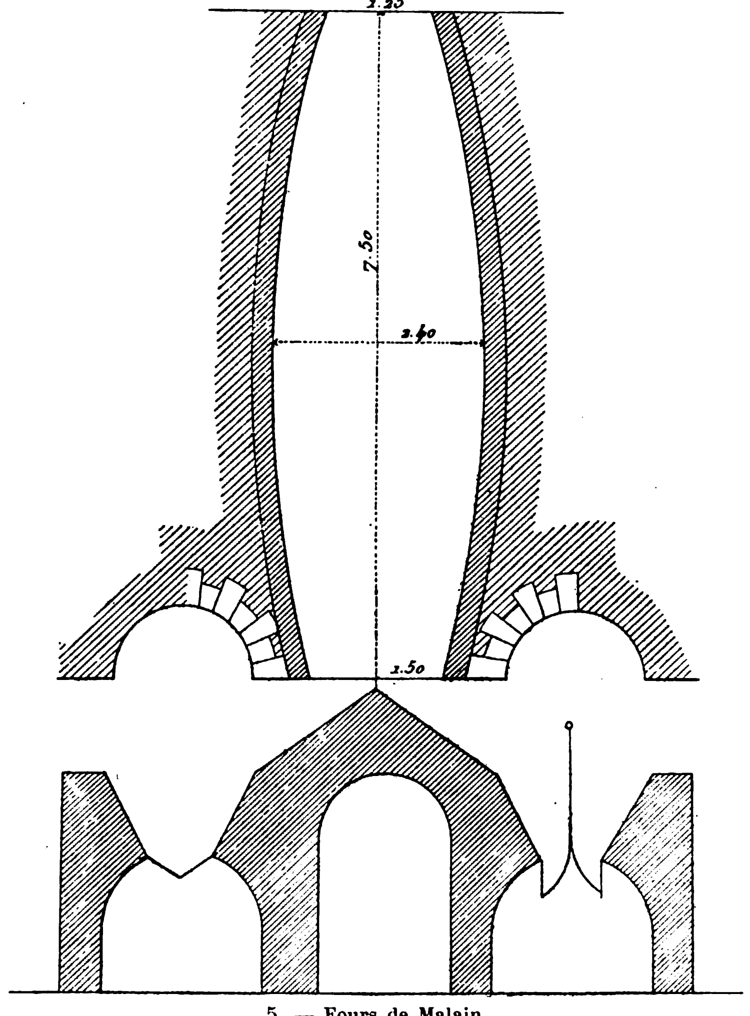


4. — Four du Teil.

l'anthracite ; pour une tonne de chaux la quantité de combustible dépensée est de 130 à 140 kilogrammes dans certaines usines, dans d'autres elle s'élève à 150 et 160 kilogrammes.

Les fours sont munis à la partie supérieure d'un couvercle mobile qui permet de régler l'allure du four ; la partie inférieure

est fermée par une grille à barreaux mobiles ; la grille est assez élevée pour que la chaux cuite puisse tomber directement dans les wagonnets. Dans d'autres usines, la chaux tombe dans des recettes situées de chaque côté du four et fermées par des trap-

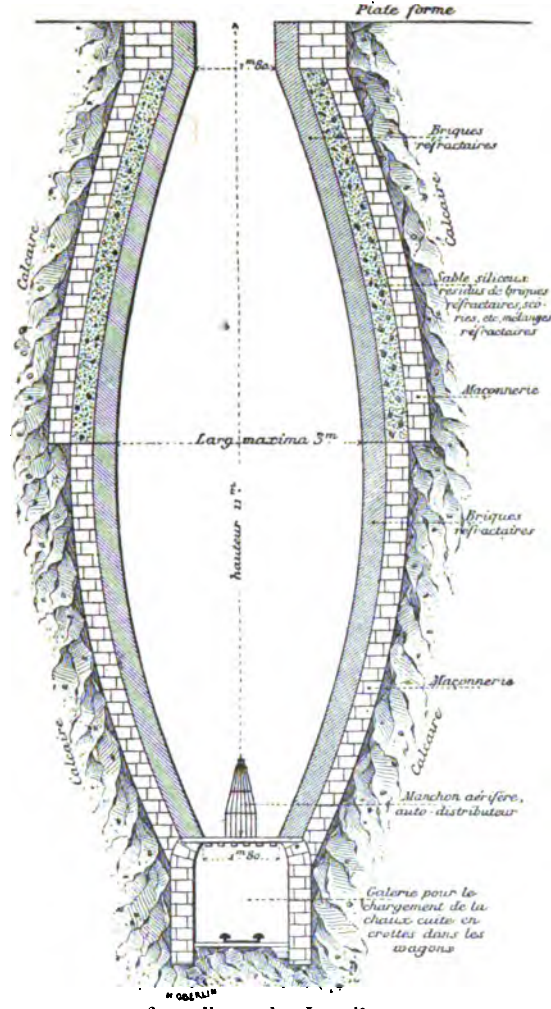


5. — Fours de Malain.

pes au-dessous desquelles viennent se placer les wagonnets (Fours de Malain, *fig*. 5).

Comme on peut le voir par les figures 4, 5 et 6, les fours généralement employés sont à peu près tous semblables ; ils ne

varient guère que par leurs dimensions. A. Marans, dans l'usine de M. Nivet, il existe des fours qui présentent une forme toute

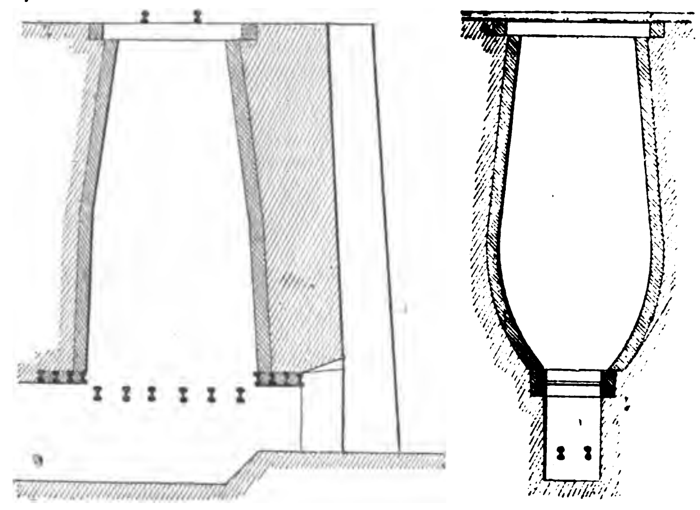


6. — Fours des Louvières.

particulière (*fig*. 7). Ces fours ont une hauteur assez réduite, 8 mètres ; ils sont plus étroits au gueulard qu'à la grille et leur section est oblongue ; le diamètre est dans la plus grande largeur de 2m,70.

La charge du four s'opère par couches alternatives de charbon et de calcaire. Quand le four est plein, on allume à la partie

inférieure et on attend que la masse se soit suffisamment affaissée pour que l'on puisse remettre une nouvelle charge de charbon et de calcaire; on continue alors en tirant de temps en



7. — Fours de Marans.

temps une certaine quantité de chaux cuite et en rechargeant avec du calcaire et du combustible de manière à maintenir le four plein.

La pierre séjourne de deux à quatre jours dans le four. On tire la plus grande partie de la chaux pendant le jour ; pendant la nuit on en tire très peu et quelquefois même pas du tout.

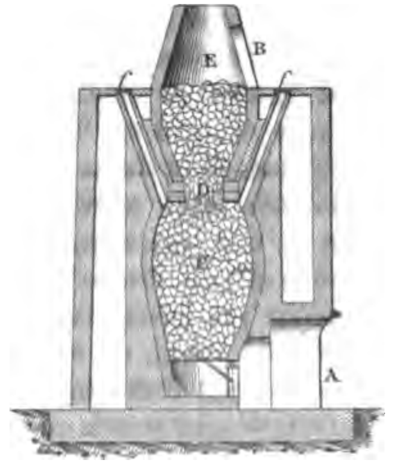
L'habileté du chaufournier consiste à opérer l'extraction de la chaux de manière à ce que la zone de cuisson se maintienne à une hauteur convenable et à régler la quantité de combustible de façon que le calcaire soit complètement cuit mais non surcuit.

La régularité de cuisson dépend des soins apportés à empêcher les perturbations produites par les agents extérieurs, vent, pluie, etc..., et aussi de la composition des calcaires. Celle-ci a, en effet, une influence marquée sur la marche des fours. La cuisson doit être assez élevée pour que les réactions de la silice et de l'alumine sur la chaux soient complètes et, en même temps, il faut qu'il reste une quantité de chaux libre non combinée assez grande pour que l'extinction se fasse rapidement. Quand la chaux a un indice peu élevé, on peut donc cuire for-

tement car il restera toujours assez de chaux libre ; quand l'indice se rapproche de celui des chaux limites, une cuisson élevée et prolongée a pour effet de diminuer la quantité de chaux libre et, de plus, celle-ci se trouve emprisonnée dans une masse vitreuse et elle s'éteint très difficilement ; avec de pareils calcaires il faut une cuisson moins intense et plus rapide.

Avec un calcaire très irrégulier, il est difficile d'obtenir un bon produit car certaines parties sont forcément trop cuites et d'autres pas assez ; pour cuire les calcaires d'indice faible on vitrifie les calcaires dont l'indice est élevé et, inversement, si ceux-si sont cuits convenablement, les calcaires qui contiennent peu d'argile sont insuffisamment cuits.

On emploie aussi quelquefois pour la cuisson des chaux hydrauliques le four Dietzsch et le four Schoffer (*fig. 8*). Nous décrirons ces fours à propos des ciments ; le four Schoffer, ou de Aalborg, a été un peu modifié pour la cuisson de la chaux ; sa hauteur est plus réduite et son diamètre un peu plus grand ; le fonctionnement est le même et nous y reviendrons plus loin. La production de ces fours varie entre 15 et 20 tonnes par 24 heures ; la quantité de combustible employée est seulement de 100 à 120 kilogrammes par tonne de chaux cuite.



8. — Four Schofer.

A galerie de défournement ; B orifice d'introduction de la pierre à chaux ; D zône de cuisson ; E cheminée ; *f* canaux par lesquels on introduit le combustible dans le four.

Extinction. — Dans la fabrication des chaux hydrauliques, l'extinction est l'opération qui est la plus importante : c'est d'elle que dépend en grande partie la qualité du produit. Cependant les fabricants ne se préoccupent généralement pas assez des soins à donner à l'extinction, et c'est à cela que l'on doit attribuer les insuccès que l'on constate si souvent avec les chaux.

Dans certaines usines on arrose la chaux au moment où elle vient d'être extraite du four, puis on la jette dans des wagonnets et elle est transportée dans des hangars où on la met en tas. Dans d'autres installations mieux disposées, la chaux est reçue à la sortie du four dans les wagonnets et elle est aussitôt conduite aux chambres d'extinction. Là on l'étale soit sur le sol, soit sur une plate-forme mobile, on la dispose en couche de 10 à 15 centimètres et on l'arrose avec un jet d'eau tombant en pluie fine jusqu'à ce que toute la masse soit bien humectée. Il faut éviter d'employer une trop grande quantité d'eau et on ne doit jamais verser l'eau brusquement car on aurait alors une chaux noyée, s'éteignant difficilement et contenant une grande quantité de parties inertes. On emploie généralement 15 à 20 °/₀ d'eau du poids de la chaux cuite, celle-ci en retient 7 à 8 °/₀.

Quand l'eau est ajoutée en quantité suffisante et dans un état de division telle que tous les morceaux de chaux soient bien humectés, l'extinction commence aussitôt ; il se dégage une grande quantité de vapeur d'eau pendant que les morceaux les plus gros éclatent en fusant et se réduisent peu à peu en poudre fine. Si la chaux est répandue sur le sol des chambres d'extinction, on la relève immédiatement en tas ; si elle a été placée sur une plate-forme mobile on la conduit aux fosses dans lesquelles elle est déversée. Dans tous les cas, il est très important de ne pas laisser la chaux se refroidir au moment de l'extinction ; il faut, au contraire, profiter de la chaleur développée pendant l'effusement pour maintenir une élévation de température aussi grande que possible dans la masse. C'est pourquoi les tas doivent être très grands ; le procédé des chambres d'extinction est encore préférable car la chaleur se conserve encore mieux et les manutentions sont d'ailleurs plus faciles.

Les chaux faiblement hydrauliques sont réduites en poudre en peu de temps ; pour les chaux à indice élevé le temps d'effusement varie de 10 à 15 et même 20 jours.

Pendant longtemps la chaux était livrée en morceaux telle qu'elle se présentait à la sortie des fours et elle n'était éteinte que sur le chantier. Ce procédé tend de plus en plus à disparaître et on se sert presque partout maintenant de chaux éteinte

et blutée qui présente beaucoup plus de garantie et donne des résultats meilleurs à tous les points de vue, à condition évidemment que l'extinction et le blutage aient été faits avec tous les soins voulus. Une chaux imparfaitement éteinte et blutée à un tamis trop gros est très dangereuse, si on l'emploie quelques jours seulement après sa fabrication; dans ce cas, en effet, les particules qui ont échappé à l'extinction s'hydratent tardivement et après que le mortier a déjà acquis une certaine dureté ; le gonflement produit par l'hydratation des parties non éteintes peut être assez considérable pour déterminer la désagrégation des maçonneries.

M. Le Chatelier a donné sur l'extinction des indications que nous croyons utile de reproduire ici en raison de l'intérêt que présente cette question.

Dans l'industrie l'extinction des chaux hydrauliques comprend quatre phases distinctes :

1° La chaux en pierre est imbibée d'eau en l'arrosant après l'avoir étendue en couche mince sur le sol devant le tas. L'eau est absorbée par la pierre poreuse en raison du phénomène physique de la capillarité, et il ne se produit au début ni réaction chimique, ni extinction, sauf pour les pierres insuffisamment cuites ou insuffisamment siliceuses. La quantité d'eau à employer doit être environ une fois et demie la quantité qui doit rester en combinaison, soit, 15 à 20 °/₀ du poids de la chaux suivant sa nature. Cet excès est nécessaire en raison des pertes par évaporation qu'amène l'échauffement de la masse. Il n'en faut pas un trop grand excès parce que le silicate de chaux, en fixant une partie de cette eau en excès, perd la propriété de durcir, et que, d'autre part, son évaporation, en amenant un trop grand refroidissement, s'oppose à l'extinction complète de la chaux. Les chaux noyées sont, en même temps, insuffisamment éteintes, ce dont on ne se méfie généralement pas ; elles sont, pour ce motif, doublement dangereuses à employer.

2° La chaux, aussitôt mouillée, est relevée à la pelle sur le front du tas, qui doit être encore chaud de façon à élever la température de la nouvelle couche ajoutée ; sous l'influence de cette élévation de température, l'hydratation de la chaux vive se produit en commençant l'extinction et dégageant ainsi une nouvelle quantité de chaleur. Mais cette

phase de l'opération ne peut pas amener l'extinction complète parce que la chaleur dégagée par les premières parties d'eau combinée provoque aussitôt une élévation de température suffisante pour provoquer la vaporisation et, par suite, l'expulsion de l'eau non encore combinée. Une partie de cette eau se répand dans l'atmosphère, où elle est définitivement perdue, l'autre va pénétrer dans les parties moins chaudes du tas, où elle contribue à l'achèvement de l'extinction. Pour obtenir un avancement assez rapide du front du tas, de façon à lui garder une température assez élevée, il faut que sa largeur soit proportionnée à la production de l'usine; il ne faut dans aucun cas que la largeur soit assez réduite pour que le refroidissement par les parois latérales abaisse trop la température moyenne de la masse. La largeur du tas, dans les usines bien organisées, ne descend pas au dessous de trois mètres. On ne peut donc pas fabriquer dans de bonnes conditions la chaux hydraulique en opérant trop en petit.

3° La chaux, après la première période d'extinction rapide, renferme encore un excès de chaux libre, mais plus d'eau disponible pour compléter l'extinction. Cette eau indispensable sera fournie à l'état de vapeur par les nouvelles quantités de matières ajoutées sur le tas; mais l'extinction est encore très incomplète si l'on a affaire à une chaux suffisamment siliceuse et bien cuite; il reste des parcelles de chaux vive plus ou moins complètement emprisonnées par le silicate en excès. En même temps, la température de la matière s'étant abaissée une certaine quantité d'eau pourra se fixer sur les silicates.....

4° Dans la quatrième période, la chaux éloignée du front du tas ne peut plus recevoir de vapeur des matières nouvelles qui commencent à s'éteindre ; elle ne peut d'ailleurs pas davantage en recevoir de l'atmosphère, car la vapeur d'eau ne saurait pénétrer au fond de ces tas épais de matières pulvérulentes qui sont très peu perméables, et cependant l'extinction de la chaux vive continue progressivement... L'extinction de la chaux vive se produit dans ces conditions exclusivement aux dépens de l'eau fixée sur les silicate et aluminate de chaux, qui abandonnent peu à peu leur eau pour la céder à un corps qui en est plus avide que lui. Le mécanisme de cette opération est d'ailleurs très simple. On sait que la formation et la décomposition des hydrates est, à chaque température, limitée par une certaine tension déterminée de vapeur d'eau. Pour l'hydrate de chaux, cette tension limite de dissociation d'efflorescence est de

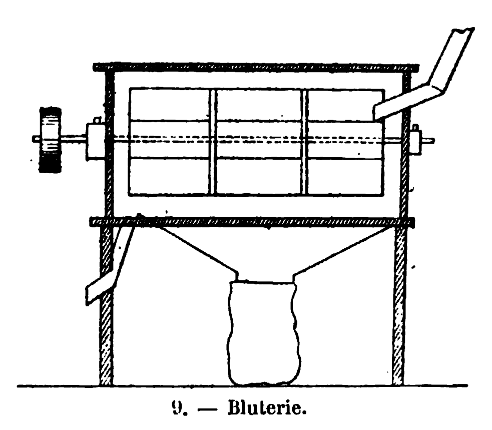
une atmosphère à 450° ; elle atteint la même valeur pour le silicate de chaux à 150°. Elle décroît d'ailleurs avec la température suivant une loi identique à celle que suit la tension de vapeur de l'eau pure. Il en résulte que, pour l'hydrate de chaux à la température ordinaire, cette tension doit être égale à une fraction inappréciable d'un millimètre de mercure, tandis que pour le silicate de chaux elle atteint plusieurs millimètres de mercure. A 100° elle n'est pas encore d'un millimètre pour le premier de ces corps ; elle est de plusieurs centimètres de mercure pour le second. Il en résulte que, dans une masse pulvérulente renfermant du silicate de chaux hydraté, l'atmosphère confinée dans les vides renfermera de la vapeur d'eau à une tension égale à celle de dissociation de cet hydrate. Cette vapeur hydratera progressivement la chaux vive restante, et, au fur et à mesure de son absorption, sera remplacée par une nouvelle quantité abandonnée par le silicate, dont la décomposition ne s'arrête qu'après le rétablissement de sa tension propre d'efflorescence. Cet échange progressif de l'eau entre le silicate et la chaux vive se fait d'ailleurs d'autant plus rapidement que la température sera plus élevée, d'une part parce que la vitesse de toutes les réactions chimiques croît rapidement avec la température, d'autre part parce que la tension d'efflorescence du silicate croît rapidement avec la température. Des expériences faites en petit au laboratoire indiqueraient que l'achèvement de l'extinction des chaux dans ces conditions demanderait, à la température ordinaire, quelques mois et, à 100°, une dizaine de jours au plus. L'expérience des usines montre que l'extinction des chaux de bonne qualité doit durer plus de huit jours et, qu'en laissant la chaux au tas pendant quinze jours, on est dans de très bonnes conditions.

Cette prolongation indispensable de l'extinction est négligée dans un trop grand nombre d'usines ; c'est la raison principale sinon exclusive de la qualité inférieure de la plupart des chaux hydrauliques. Dans toute usine où l'on voit, comme cela arrive fréquemment, l'extinction arrêtée au bout de quarante-huit heures, on peut être assuré que les produits fabriqués laissent à désirer. Il n'y a, en effet, que deux alternatives : si la chaux est bonne comme composition chimique et comme cuisson, son extinction est alors certainement incomplète et elle gonflera à l'emploi. Si, au contraire, l'extinction est réellement complète au bout de quarante-huit heures, c'est que la chaux a été trop peu cuite ou est trop peu siliceuse ; elle sera insuffisamment hydraulique et ne pourra pas

atteindre un durcissement égal à celui des bonnes chaux hydrauliques. L'amélioration de l'extinction entraînerait un grand progrès dans la fabrication des chaux hydrauliques sans exiger une élévation importante du prix de revient (1) ».

Blutage. — La chaux une fois réduite en poudre est portée aux blutoirs qui permettent de recueillir toute la partie pulvérulente et de mettre à part les morceaux d'un volume appréciable qui sont composés soit de petits fragments d'incuits, soit de surcuits qui ont échappé à l'extinction.

La chaux passe tout d'abord à travers une grille dont les barreaux sont espacés de 0,02 à 0,03 et qui retient les plus gros fragments d'incuits ou de surcuits. Les blutoirs sont constitués par des cylindres à section polygonale tournant autour d'un axe légèrement incliné ; la surface est garnie de toile métallique n° 40 ou n° 50, c'est-à-dire de 220 mailles ou de 324 mailles par centimètre carré. Les blutoirs font de 60 à 80 tours à la minute. La matière à tamiser arrive par l'extrémité la plus élevée, elle est projetée sur la toile par le mouvement de rotation ; les parties fines traversent le tamis et les grains trop gros sont finalement rejetés au dehors du blutoir où ils sont recueillis dans des sacs ou repris par des vis ou tout autre moyen de transport. La chaux qui a traversé la toile métallique est reçue dans une trémie se terminant par une ouverture à laquelle on fixe le sac à remplir (*fig.* 9). Les sacs, après avoir été tarés à un poids uniforme, sont fermés et plombés et ils sont prêts alors à être expédiés.



9. — Bluterie.

L'extinction et le blutage s'opèrent, en France, à très peu près

(1) Extinction et silotage des chaux et ciments, par M. H. Le Chatelier. *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.* Janvier, 1895.

de la manière que nous venons de décrire dans toutes les usines qui produisent des chaux de bonne qualité. Il faut noter cependant que la chaux résultant du premier tamisage est rarement livrée telle quelle ; on la mélange le plus souvent avec les produits résultant de l'extinction ou de la mouture des grappiers dont nous parlerons bientôt.

Chaux lourde. — Dans certaines régions, on fabrique de la chaux plus spécialement désignée sous le nom de chaux lourde et qui paraît être un intermédiaire entre la chaux hydraulique et le ciment naturel. Les calcaires qui produisent ces chaux ont un indice élevé ; la chaux est cuite assez fortement puis elle est éteinte à la manière ordinaire, mais l'extinction ne dure que six à sept jours. On procède alors au blutage et l'on obtient la chaux légère ; il reste environ 30 °/₀ de matières qui n'ont pas été réduites en poudre ; on les passe aux meules en laissant à celles-ci un écartement de 10 à 15 millimètres : les parties tendres sont seules réduites en poudre, et c'est cette poudre qui, une fois blutée, constitue la chaux lourde. Enfin les parties les plus dures qui sont composées de morceaux vitrifiés et dont la proportion peut être de 5 à 10 °/₀, sont broyés finement et se vendent comme ciment.

Il existe beaucoup d'usines où l'on se préoccupe moins de produire de bonne chaux que d'obtenir un très bas prix de revient et où l'on a simplifié encore les diverses opérations. La chaux sortant des fours est arrosée, mise en tas et deux ou trois jours après on la tamise ; les morceaux non éteints sont passés aux meules et réduits en poudre grossière ; le tout est mélangé, mis en sacs et expédié. Ce procédé est employé surtout dans la région de Tournai où la fabrication de la chaux a pris un développement considérable. Ces produits sont, évidemment, très imparfaits, et ils donnent souvent lieu à des mécomptes quand on n'a pas soin de ne les employer qu'après un certain temps de séjour en sacs.

Grappiers. — La chaux résultant du premier tamisage est appelée fleur de chaux ; le résidu, qui est composé d'incuits et de surcuits non éteints, n'est pas rejeté ; on lui fait subir une

nouvelle extinction plus prolongée que la première et la chaux éteinte est mélangée avec la fleur de chaux. Enfin le résidu obtenu après ce second blutage constitue ce que l'on appelle les grappiers; c'est un mélange d'incuits, de surcuits, et de fragments de chaux hydratée. Quand la cuisson est bien conduite et que les calcaires ne sont pas trop irréguliers, la porportion d'incuits est faible; la chaux hydratée peut aussi se trouver en petite quantité si l'extinction est faite soigneusement de manière à éviter la production de chaux noyée. Il reste alors en majeure partie des fragments verts ou gris très durs qui sont les véritables grappiers. Ceux-ci proviennent soit des parties plus riches en argile qui peuvent se trouver disséminées dans les calcaires et qui, portées à une température élevée, ont subi un commencement de vitrification, soit de la combinaison des cendres du combustible avec le calcaire.

D'après M. Bonnami, la plus grande partie des grappiers doit provenir de la surface des calcaires qui se trouvent pendant la cuisson en contact avec les cendres du combustible. Cela paraît douteux cependant, car les cendres des combustibles employés pour la cuisson sont presque toujours très alumineuses, comme on le verra plus loin. Or dans les grappiers proprement dits, on trouve toujours très peu d'alumine; on pourra en juger par les analyses suivantes que nous empruntons à l'ouvrage de M. Le Chatelier sur la constitution des mortiers hydrauliques (1).

	Sio^2	SaO	Al^2o^3	Fe^2c^3	Ho et Co^2	Mgo So^3 etc...	Eq. de CaO pour 1 éq. de Sio^2
Grappiers gris-Paviers . .	26,0	66	3,0	1,2	1,1	1,0	2,75
— Teil . . .	26,0	66	3,5	0,8	1,0	1,0	2,75
Grappiers verts — . . .	24,0	69	2,7	0,3	1,0	1,0	3,08
— Senonches.	25,5	68	3,6	0,7	1,3	1,3	2,85

(1) Les véritables grappiers se trouvent dans les chaux siliceuses. Quelques ciments de grappiers contiennent une quantité d'alumine assez élevée; mais les chaux dont ils sont extraits sont aussi alumineuses. D'ailleurs ce ne sont plus des grains disséminés dans la masse du calcaire, mais plutôt des surcuits provenant de certains bancs qui, pris isolément, donneraient des ciments prompts.

Ces grappiers étaient autrefois rejetés comme produit sans valeur ; depuis un certain nombre d'années on a reconnu qu'en les traitant convenablement on pouvait en faire un ciment à prise lente. Ce ciment est vendu comme tel ou bien il est mélangé avec la chaux, il en élève l'indice et augmente son énergie. Cette utilisation des grappiers demande toutefois de grande précautions.

« L'amélioration résultant de l'addition des grappiers broyés à la chaux est souvent contestée, dit M. Le Chatelier ; cette divergence d'opinions provient de ce que l'on réunit, sous le nom de grappiers, des matières très dissemblables. Le mot grappier désigne tout ce qui échappe à la pulvérisation par extinction ; c'est un mélange renfermant d'une part des calcaires non cuits, de la chaux noyée et déjà prise, de la wollastonite, toutes matières blanches ou jaunâtres et à peu près inertes, et d'autre part des grains gris noirs, très durs, qui sont de véritable ciment. La proportion de ces derniers varie, suivant la nature des chaux et leur cuisson, de plus de 50 % à moins de 1 %. Si, dans le premier cas, l'addition des grappiers est avantageuse, elle ne peut être que nuisible dans le second cas. »

Un inconvénient très grave peut encore résulter de l'emploi des grappiers si l'on n'a pas pris soin d'assurer l'extinction de toutes les parties contenant de la chaux libre ; celles-ci, par suite de la température élevée qu'elles ont subie, et qui a eu pour effet de les vitrifier, ne sont atteintes qu'avec une extrême lenteur par l'action de l'eau ; les grappiers peuvent alors déterminer le gonflement des mortiers.

Quand les grappiers doivent être transformés en ciment, ou quand on les réincorpore à la chaux, il est donc indispensable de les laisser plusieurs semaines à l'air avant de les faire passer aux meules.

Dans certaines usines on ne peut utiliser les grappiers qu'après un an au moins de séjour en silos.

La proportion des grappiers est très variable suivant la composition des calcaires ; quand l'indice est de 0,30 à 0,40 on n'a guère que 10 % de grappiers ; avec des calcaires à indices de 0,40 à 0,45, on peut avoir jusqu'à 20 à 30 % de grappiers.

3. Propriété. — *Composition chimique.* — Comme nous l'avons dit précédemment, les chaux hydrauliques sont composées essentiellement de silice et de chaux ; on y trouve aussi de

Provenance	Sable siliceux	Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Magnésie	Acide Sulfurique	Perte au feu	Produits non dosés	Indice d'hydraulicité
* Echoisy (Charente)	»	11,70	4,60	2,30	59,20	1,40	»	20,80	»	0,28
* Malain (Côte-d'Or)	»	10,60	4,45	1,35	65,85	0,50	0,80	16,45	»	0,23
* Saint-Antonin (Tarn-et-Garonne)	»	12,65	5,30	2,35	62,80	2,30	3,40	11,20	»	0,29
* Argenteuil (Seine-et-Oise). .	»	17,85	5,20	2,40	56,80	1,35	1,30	14,90	»	0,41
* Les Moulineaux (Seine) . .	2.40	19,45	5,00	3,15	57,80	0,55	0,75	10 90	»	0,42
* Paviers (Indre-et-Loire) . .	»	23,00	2,05	1,05	61,50	0,65	»	11,75	»	0,41
* Marans (Charente-Inférieure)	»	13,70	5,90	2,70	58.10	1,40	»	18,20	»	0,34
* Saint-Astier (Dordogne) . .	»	21,85	1,35	2,85	62,25	1,05	0,50	10,15	»	0,37
* Contes-les-Pins (Alpes-Maritimes).	»	22,55	5.00	2,60	57,75	0,60	1,35	10,15	»	0,48
* Senonches (Eure-et-Loir). .	»	21,60	1,60	1,30	61,10	1,70	»	12,70	»	0,38
* Le Teil (Ardèche)	»	23,13	1,72	0,73	63,76	0,97	»	9.69	»	0,39
* —	0,30	19,05	1,60	0,55	65,10	0,65	0,30	12,45	»	0,32
* Cruas (Ardèche)	0.30	21,60	2,00	1,25	65.80	0.35	0,15	8,55	»	0,36
* Beffes (Cher)	1,35	15,50	4,25	3.20	61.35	1,05	0,45	12,85	»	0,32
Le Teil	»	23,40	1,77	0,83	64,85	0,30	0,42	8,60	»	0,38
—	»	21.70	3.19	0.66	60,70	0,85	0,60	12,20	0.10	0,41
—	»	23,45	0,76	0,79	63,70	1,26	0,58	9,20	0,18	0.38
—	»	21,00	1,46	0,73	59,80	1,44	0,63	14,73	0,21	0,38
Beffes	»	16.30	5,41	2,09	58,90	1,15	0,90	14.90	0.35	0,37
—	»	16,20	4,11	2,09	60,3[illegible]	0,54	0,77	16,00	»	0,33
Senonches	»	18,90	3,14	1,46	60,46	0,72	0,73	14.25	0,34	0,36
Tournai.	»	19,75	3.44	1,16	61,85	0,60	0.45	12,55	0,20	0,37
—	»	19,30	4,44	1,26	59.42	1,51	0,60	13,40	0,07	0.39
—	»	22,20	3,30	1,20	58,50	1,15	0,72	12,40	0,53	0 43
—	»	21,10	3 90	2,00	63,32	1,20	0.63	8,75	0,10	0,39
—	»	10,20	4,32	1,88	58,12	1,11	0,34	24.00	»	0,25
—	»	25,80	5,65	1,57	57,50	0,68	0,90	8.10	»	0,55
Sauveterre (Lot-et-Garonne).	»	15,10	5,00	1.80	57.00	3,90	1.40	15,8	»	0,35
Scilley	»	18.90	6.23	1.87	58,75	1,29	0.54	12,10	0,32	0,42
Saint-Bernard	»	17,80	5,51	1,39	60.10	0,50	0,65	13,88	0,17	0,39
Ancy-le-Franc	»	20,50	4,70	1,30	61,00	1,00	0.50	10,80	0,20	0,41
Xeuilley.	»	15,40	7,72	2,78	54.30	1,18	0 93	18,03	»	0,43
Vitry (vve Roze Robert) . .	»	14,70	6,10	2.30	62,65	0,73	0,53	12.60	0,29	0,33
Virieu (chaux légère) . . .	»	22.40	5,75	2,70	56,10	1.50	1.00	10,55	»	0,50
Virieu (chaux lourde) . . .	»	2[illegible],65	6,50	2,85	51,80	1,40	1,30	9,50	»	0,63

NOTA. — Les analyses marquées d'une astérisque sont extraites de la *Chimie appliquée à l'art de l'Ingénieur*, par M. l'Inspecteur général des Ponts-et-Chaussées Durand Claye.

l'alumine, de l'oxyde de fer, de la magnésie, de l'acide sulfurique et enfin une certaine quantité d'eau et d'acide carbonique provenant de l'extinction.

Le tableau ci-contre, page 24 donne quelques analyses des chaux les plus renommées.

Prise. — On a vu précédemment que les chaux, selon leur degré d'hydraulicité, font prise, sous l'eau, dans un temps qui varie de deux jours à trente jours. Les chaux hydrauliques proprement dites et les chaux éminemment hydrauliques, les seules qui soient intéressantes à examiner, font prise en deux ou trois jours; la chaux du Teil qui, par sa composition chimique, doit être classée dans les chaux hydrauliques proprement dites, fait même prise en 24 heures environ.

Les chaux qui contiennent une quantité notable d'alumine font prise plus rapidement que les chaux exclusivement siliceuses; ainsi la chaux de Marans dont la teneur en alumine est de 6 % environ et dont l'indice d'hydraulicité est à peine de 0,32, fait prise aussi rapidement que les chaux siliceuses dont l'indice est de 0,38 à 0,40.

La prise des chaux hydrauliques donne des renseignements très utiles sur leur qualité. Quand une chaux prend très rapidement, et surtout si l'on constate pendant la prise une élévation de température, même très faible, il y a tout lieu de croire que cette chaux est défectueuse; elle contient des parties non éteintes et elle peut gonfler et se désagréger par la suite. Si, connaissant l'indice d'une chaux, on obtient une prise plus lente que celle des chaux de la même classe, on a affaire à un produit éventé ou dans lequel il existe de fortes proportions de chaux noyée, d'incuits ou de parties sableuses, qui pourront être décélées par l'analyse.

Densité. — La densité apparente des chaux est très variable; le poids d'un litre de chaux mesuré sans tassement est de 500 à 600 grammes pour les chaux légères et de 700 à 800 grammes pour les chaux lourdes. Comme nous le ferons remarquer plus spécialement à propos des ciments, la densité apparente ne présente pas un grand intérêt si l'on ne tient pas compte en même

temps de la finesse de la poudre, qui a sur la densité une influence très grande. Cependant, en raison des grandes différences que présentent les chaux, la densité apparente donne un renseignement plus utile que pour les ciments, mais à la condition de ne pas s'en tenir à la détermination de la densité seulement; il faut doser également les parties insolubles dans l'acide chlorhydrique et dans une solution de potasse. Une chaux lourde peut être plus mauvaise qu'une chaux légère, dans le cas, par exemple, où la première renferme des incuits, des surcuits non éteints ou des parties sableuses qui augmentent le poids mais qui constituent des matières inertes ou dangereuses.

La densité absolue, ou poids spécifique, est comprise entre 2,50 et 2,80 selon le degré d'hydraulicité des chaux. Nous traiterons la question du poids spécifique plus spécialement à propos des ciments.

Finesse. — Les chaux éteintes et blutées sont généralement très fines; il y a intérêt, en effet, à employer pour le tamisage des toiles aussi fines que possible pour empêcher les surcuits non éteints de passer dans la chaux. Les chaux bien fabriquées ne laissent pas plus de 20 à 25 °/₀ de résidu sur le tamis de 4 900 mailles, et 3 à 6 °/₀ sur celui de 900 mailles par centimètre carré.

Quand la chaux est imparfaitement éteinte et qu'elle est passée aux meules, elle contient beaucoup plus de résidu; c'est ainsi que dans les chaux de Tournai il n'est pas rare de constater 30 à 40 °/₀ de déchet sur le tamis de 4 900 mailles par centimètre carré, 15 à 20 °/₀ sur celui de 900 mailles et 7 à 8 °/₀ sur celui de 324 mailles.

Nous reviendrons sur la résistance des chaux hydrauliques à propos des mortiers. Nous nous bornerons ici à donner quelques indications sur les résistances que l'on obtient au laboratoire dans les essais normaux sur la chaux pure et le mortier 1:3.

On conçoit que les chiffres doivent varier beaucoup non seulement entre les diverses classes de chaux, mais même d'une usine à une autre; des chaux de même indice peuvent donner des résultats très différents. Aussi trouve-t-on très peu de cahiers

des charges pour les réceptions de chaux prescrivant des essais de résistance, on se borne généralement à la densité et à la prise.

Les chaux légères, c'est-à-dire, celles dont la densité est inférieure à 600 grammes au litre, ne commencent à présenter une dureté appréciable qu'au bout de un mois environ; le plus grand accroissement de résistance se produit de un à six mois; la résistance augmente ensuite plus lentement jusque vers 2 ans, puis elle paraît rester stationnaire.

La chaux de Marans que l'on peut considérer comme une des meilleures chaux légères donne, gâchée en pâte pure 3 kilogrammes par centimètre carré après un mois, 10 kilogrammes à 6 mois, et 13 kilogrammes à un an, le mortier 1 : 3 donne à peu près les mêmes résultats. Le poids du litre de cette chaux est de 0kg,450.

Avec les chaux lourdes, on obtient des résistances un peu plus élevées, mais l'allure est à peu près la même. Voici les résultats obtenus à l'usine Pavin de Lafarge avec des briquettes de chaux pure et de mortier à 300 kilogrammes de chaux pour 1 mètre cube de sable (moyenne de 20 séries).

Résistance par centimètre carré à la traction

	Chaux pure	Mortier
7 jours	3kg,9	2kg,6
28 jours	9, 4	5, 8
3 mois	16, 0	10, 1
6 mois	19, 7	12, 1
1 an	22, 2	14, 9
1 an 1/2	23, 5	17, 9
2 ans	22, 5	19, 2

Les expériences sur la résistance des chaux, telles qu'on les exécute dans les laboratoires d'essais de matériaux sont d'ailleurs assez difficiles à interpréter. Quand il s'agit de chaux de même indice, par exemple, ce ne sont pas toujours les produits les mieux fabriqués qui donnent les plus fortes résistances. Nous avons eu plusieurs fois l'occasion d'expérimenter des chaux qui, gâchées à l'eau douce, donnaient de très bons résultats, et qui se décomposaient au bout de quelques mois à l'eau de mer; d'autres chaux présentaient des résistances plus faibles à l'eau douce mais elles n'étaient pas altérées par l'eau de mer; les pre-

mières contenaient évidemment de la chaux libre. Nous avons d'ailleurs remarqué, sur un grand nombre d'échantillons de chaux et de ciments, que la présence d'une petite quantité de chaux libre augmentait sensiblement la résistance des mortiers, surtout quand ceux-ci sont conservés dans l'eau de mer ; cet accroissement peut d'ailleurs être suivi au bout de quelques mois d'une chute ou même d'une décomposition complète.

La finesse très grande des chaux et les soins apportés à l'extinction et au blutage ne paraissent pas non plus être toujours mis en lumière par les essais de résistance ; en voici un exemple pris parmi un assez grand nombre d'expériences (1) :

Provenance	Poids du litre	Résidu sur le tamis de			Résistance par centimètre carré de la traction													
					Briquettes conservées dans l'eau douce							Briquettes conservées dans l'eau de mer						
		324m	900m	4 900m	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans
	gr.				kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Le Teil. .	800	2	8	19														
Chaux pure.					3,0	6,9	11,6	15,9	16.5	16,8	22,6	3,7	9,4	17,4	20,1	23,0	20,7	20,7
Mortier 1:3					4,2	8,2	16,2	18,1	21,7	23,3	20,5	4,6	12,2	20,4	20,6	21,2	22,1	22,2
Chaux de Tournai .	755	9	14	33														
Chaux pure.					3,0	6,0	12,4	18,7	22,0	21,5	20,2	3,0	6,1	15,4	12,1	17,7	12,9	18,0
Mortier 1:3					3.2	7,1	14.2	22,6	29,0	23,6	21,9	2,9	9 2	19,1	25,6	25,9	25,1	23,6

L'allure de ces deux chaux est à peu près la même ; cependant on remarque que pour la deuxième le maximum est atteint plus rapidement et que la résistance décroît ensuite sensiblement.

Les essais qui précèdent ont été faits en suivant la méthode indiquée dans le cahier des charges des ports de Boulogne et

(1) Les mortiers de chaux pure ont été gâchés avec 50 % d'eau. Pour les mortiers 1 : 3 on a employé du sable normal (quartz concassé et tamisé) ; la quantité d'eau de gâchage était de 11, 5 % du poids du mélange, le mortier a été comprimé fortement dans les moules. La section des briquettes était de 5 centimètres carrés, comme dans toutes les expériences qui seront citées par la suite.

de Calais, c'est-à-dire que le mortier 1 : 3 a été gâché avec très peu d'eau et comprimé fortement dans les moules. Cette compression augmente considérablement la résistance. La densité des briquettes en rend déjà compte. Ainsi, on arrive, en comprimant, à obtenir des mortiers dont la densité s'élève à 2,10 et 2,15, tandis que si le mortier est gâché à la consistance ordinaire du chantier la densité n'est plus que de 1,8 à 1,9. Avec les ciments lourds la différence est bien moindre.

L'insuffisance des essais de résistance à déterminer la qualité des chaux avait amené M. Le Chatelier à préconiser l'emploi de l'eau chaude afin d'exagérer les effets de la chaux libre; les produits défectueux sont alors considérablement affaiblis tandis que les chaux bien fabriquées durcissent au contraire beaucoup mieux. M. Le Chatelier cite les expériences suivantes faites sur des chaux du Teil et de Paviers et sur des chaux de seconde marque.

	Essai à froid				Essai à 80°	
	1re semaine	3e semaine	6e semaine	gonflement	1re semaine résistance	1re semaine gonflement
	kg.	kg.	kg.		kg.	
Chaux du Teil	12 5	19,5	39,0	nul	69,0	nul
Chaux de Paviers. . .	3,6	6,5	17,0	nul	48 0	nul
Chaux n° 1	19,5	33,0	51,0	faible	30.0	15 °/₀
— n° 2	8,0	13,0	33,0	id.	7,5	30 —
— n° 3	16,5	21,0	27,0	id.	15,0	30 —

« Ces nombres expriment l'effort d'écrasement par centimètre carré de petits cylindres de 2 centimètres de hauteur et de 2 centimètres de diamètre. »

Nous reviendrons sur la question des essais à l'eau chaude à propos des ciments.

La résistance des mortiers de chaux à la compression est environ 5 à 6 fois plus élevée que la résistance à la traction. Voici quelques résultats d'essais à la compression exécutés dans les mêmes conditions que les expériences à la traction citées plus

haut et sur les mêmes échantillons de chaux. Les mortiers ont été comprimés fortement dans les moules.

Résistance par centimètre carré à la compression

	Résistance par centimètre carré à la compression (cubes de 50 cc. de surface)													
	Eau douce							Eau de mer						
	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans
	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Chaux du Teil.														
Chaux pure . .	0	17,0	45,3	86,7	145,0	151,7	143,0	0	32,0	72,0	113,3	165,0	161,7	158,3
Mortier 1 : 3 .	30,3	43,7	90,3	103,3	141,7	158,3	120,0	33,3	67,0	95,3	115,0	141,7	155,0	125,8
Chaux de Tournai														
Mortier 1 : 3 .	0	48,7	»	123,0	151,7	186,7	138,3	»	60,0	»	145,0	161,7	151,7	125,0

M. l'Inspecteur général des Ponts-et-Chaussées Durand Claye s'exprime ainsi au sujet de la résistance des chaux hydrauliques (1) :

La résistance des pâtes de chaux hydraulique desséchées, à la rupture par traction, par écrasement ou par flexion, est très variable ; elle n'est pas toujours en rapport avec le degré d'hydraulicité. Dans les expériences de Vicat, les échantillons essayés à la flexion n'ont pu supporter un effort dépassant 6 à 7 kilogrammes par centimètre carré, tandis que les chaux grasses lui fournissent de 7 à 9 kilogrammes La résistance d'une chaux hydraulique dépend beaucoup du soin apporté à sa fabrication. Avec les chaux de médiocre qualité, la résistance de la pâte ne dépasse et n'atteint même pas 1 kilogramme par cent. carré à la traction et quelques kilos à la compression. Les chaux supérieures résistent beaucoup plus. La chaux du Teil, par exemple, ne s'arrache en moyenne que sous un effort de près de 12 kilogrammes. par cent. carré et ne s'écrase que sous un effort de 86 kilogrammes après 3 mois d'immersion.

Le tableau n° 1 (voir à la fin du volume) contient les résultats obtenus avec des chaux hydrauliques de qualité supérieure employées en mortiers à différents dosages et avec des sables de

(1) *Chimie appliquée à l'art de l'Ingénieur*, Baudry et Cie éditeurs, édition de 1885.

différente nature. On remarquera que, en général, la résistance progresse lentement jusqu'au troisième mois, du troisième au sixième mois elle augmente rapidement, puis elle ne s'accroît plus que dans des proportions assez faibles, si ce n'est à la compression ; elle paraît atteindre son maximum à un an.

Les mortiers de chaux hydraulique sont désagrégés par la gelée quand ils s'y trouvent soumis dans les premiers jours du durcissement ; cela tient à la grande quantité d'eau nécessaire pour le gâchage et dont une partie seulement n'entre que très lentement en combinaison. Les chaux lourdes dont la prise s'effectue assez rapidement et qui demandent pour le gâchage une quantité d'eau moindre, sont celles qui résistent le mieux à la gelée ; avec des chaux faiblement hydrauliques, la gelée peut avoir des effets désastreux très longtemps après la mise en place des mortiers.

Les mortiers de chaux hydrauliques, qui sont employés couramment pour les travaux à la mer dans la Méditerranée, le sont très rarement dans l'Océan. Des diverses tentatives et des expériences exécutées en vue de constater la résistance des mortiers de chaux à l'eau de mer dans différents ports de l'Océan, il est résulté que même les chaux les plus estimées ne peuvent résister au delà de quelques années ; les expériences faites à la Rochelle par MM. Coustolle et Viennot, Ingénieurs des ponts et chaussées, et qui ont porté sur des quantités considérables de blocs immergés en mer libre, sont à cet égard très concluantes (1). Cette différence semble tenir, non à la composition de l'eau comme on l'a pensé, mais à ce que la marée est à peine sensible dans la Méditerranée tandis que sur les côtes de l'Océan la différence de niveau entre la haute et la basse mer peut atteindre jusqu'à 14 mètres et, dans tous les cas, est toujours importante. Les maçonneries, tour à tour immergées et hors de l'eau, sont dans les meilleures conditions pour se décomposer. A la marée haute, l'eau pénètre dans le mortier et elle en ressort à marée basse, ce mouvement de va et

(1) Documents communiqués à la commission des ciments au Ministère des travaux publics. Séance du 5 juin 1889. — Journal « *le Ciment* » nos 3, 4 et 5. Année 1896.

vient renouvelle l'eau dans l'intérieur des maçonneries et celle-ci détermine rapidement la destruction des mortiers qui contiennent de la chaux hydratée en assez grande quantité ; toutes les chaux hydrauliques sont dans ce cas. Nous verrons d'ailleurs que les mortiers de chaux sont toujours poreux et qu'ils sont par conséquent susceptibles d'être parcourus par l'eau (1).

4. Renseignements généraux. — La classification de Vicat n'est plus guère usitée aujourd'hui et dans le commerce on divise simplement les chaux en chaux lourdes et chaux légères. Ces dernières ont peu de valeur et on les emploie principalement dans les constructions civiles. Les chaux lourdes présentent seules quelques garanties quand elles sont bien fabriquées. (On doit excepter quelques chaux légères comme celle de Marans dont la fabrication est particulièrement soignée).

Les difficultés que présentent les essais de chaux ont conduit à remplacer dans les cahiers des charges des prescriptions forcément vagues et insuffisantes par l'indication de marques connues et dont la réputation est bien établie. Pour obtenir un renseignement ayant quelque précision sur la qualité d'une chaux, il faut au moins quatre semaines ; on ne peut généralement pas attendre aussi longtemps pour mettre la chaux en œuvre et on est ainsi amené à contrôler simplement sa provenance. Cette absence d'essais de réception a d'ailleurs des inconvénients sérieux sur lesquels il n'est pas besoin d'insister ; c'est ainsi que des produits de qualité absolument inférieure finissent par envahir peu à peu tous les grands chantiers de travaux publics.

C'est en France que la fabrication de la chaux hydraulique a pris le plus grand développement. Les célèbres usines du Teil produisent à elles seules à peu près autant de chaux que toutes les autres réunies. On peut citer encore dans la région du midi

(1) Les mortiers de chaux résistent d'ailleurs beaucoup moins bien qu'on ne le croit généralement, même dans la Méditerranée. M. l'Ingénieur des Ponts et chaussées Equer, dans une note adressée à la commission des ciments (séance du 17 juillet 1890), a décrit des phénomènes de décomposition de bétons de chaux qui se sont produits à Toulon et il termine en disant que l'on pourrait citer dans les autres ports des exemples nombreux de décompositions.

l'usine de Contes-les-Pins, près de Nice, et celle de MM. Romain Boyer et Cie à Marseille.

Il existe un centre très important de fabrication de chaux à Saint-Astier, dans la Gironde; on trouve aussi un certain nombre d'usines dans le Lot et le Lot-et-Garonne.

Dans la région de l'Ouest, les seules usines importantes sont celles de M. Nivet à Marans et celles d'Echoisy. L'usine de M. Huguet à Paviers et celle de Senonches comptent parmi les plus anciennes de France. Dans le Cher, aux environs de Beffes, la fabrication de la chaux a pris depuis quelques années un grand essor ; trouvant dans le marché de Paris un débouché considérable, les usines de cette région se sont multipliées ; mais ces chaux sont, en général, très légères et, à part quelques bonnes marques, elles donnent souvent des résultats peu satisfaisants.

Dans l'Est, les principales usines sont celles des Louvières (Veuve Roze-Robert) et de Vitry (Gonod et Girardot), de Ville-Sous-la-Ferté, d'Ancy-le-Franc, de Clairvaux (société des chaux de l'Aube), de Xeuilley (Meurthe et Moselle).

La chaux que l'on fabrique dans le département de l'Ain à Virieu-le-Grand, à Béon, à Bons sont caractérisées par une densité apparente très élevée ; le poids du litre dépasse 1 000 grammes ; la prise est aussi plus rapide que celle des chaux ordinaires, elle se produit en 6 à 8 heures. Les usines de Montalieu et de Bouvesse dans l'Isère, produisent aussi des chaux lourdes se rapprochant des ciments naturels.

Il est assez difficile d'indiquer d'une manière précise quelle est l'importance de la fabrication de la chaux hydraulique en France ; on peut l'évaluer approximativement à 600 000 tonnes de chaux lourde. Pour la chaux légère, il nous serait impossible de fixer un chiffre, même approché.

Sur les grands chantiers de travaux publics, la chaux est dosée en poids ; mais pour les travaux particuliers, l'usage à peu près général est de doser la chaux en volume. Il en résulte que les chaux lourdes ne peuvent lutter avec les chaux légères puisqu'on les achète au mètre cube et finalement celles-ci, malgré leur qualité plus que médiocre, se vendent souvent à un prix plus

élevé. L'usage général de doser la chaux au poids, qui est d'ailleurs le seul rationnel, amènerait immédiatement une amélioration considérable dans l'industrie des chaux hydrauliques en favorisant les produits de bonne qualité et en encourageant les efforts des fabricants.

Le prix de la chaux varie de 8 à 12 francs la tonne à l'usine; les chaux les plus estimées se vendent à 14 et 15 francs.

Les usines de la région du midi exportent de grandes quantités de chaux par Marseille et Cette; celles du sud-Est écoulent une grande partie de leur production en Suisse. Par contre les chaux belges de Tournai sont importées en quantités considérables dans le Nord et l'Est de la France.

CHAPITRE II

CIMENTS ARTIFICIELS

I. CIMENT PORTLAND

1. Historique. — La découverte du ciment Portland est attribuée à un briquetier du comté d'York, Joseph Apsdin. La patente qu'il prit en 1824 pour la fabrication de ce ciment était ainsi conçue :

« La méthode que j'emploie pour fabriquer un ciment ou pierre artificielle (que je nomme ciment Portland) et qui est destiné à la confection des enduits, des travaux d'eau, des citernes, ou à tout autre objet auquel il peut être appliqué, est la suivante : Je prends une quantité déterminée de pierre à chaux telle qu'on l'emploie généralement pour faire ou réparer les routes, et je la prends sur les routes quand elle a été réduite en boue ou en poudre ; mais si je ne peux pas m'en procurer une assez grande quantité sur les routes je me sers de la pierre à chaux elle-même ; puis je calcine la boue, la poudre ou la pierre à chaux, selon le cas. Je prends ensuite une quantité déterminée de terre argileuse ou d'argile, et, soit à la main, soit à la machine, je malaxe les deux matières avec de l'eau de manière à les rendre à peu près impalpables. Après cette opération je place le mélange sur une plate-forme sur laquelle il doit être desséché soit par la chaleur du soleil soit par l'action du feu ou de la vapeur passant dans des canaux sous la plate-forme, jusqu'à ce que l'eau soit entièrement évaporée. Je divise alors ce mélange en morceaux de grosseur convenable et je calcine dans un four semblable aux fours à chaux jusqu'à ce que l'acide carbonique soit complètement expulsé. Le mélange, après avoir été ainsi calciné, est écrasé et réduit en poudre fine ; il se trouve alors dans un état propre à faire du ciment ou de la pierre artificielle. Cette poudre doit être mélangée avec une quantité d'eau

suffisante pour l'amener à consistance de mortier et celui-ci est alors appliqué aux travaux auxquels il était destiné ».

Il est intéressant de rappeler la patente que M. Maurice Saint-Léger avait prise en France, en 1818, à la suite des travaux de Vicat et sur les indications de l'illustre ingénieur : « Je prends de la craie, de la pierre, ou toute autre substance qui peut donner de la chaux, je la pulvérise et j'y ajoute de l'argile ordinaire ou toute autre substance contenant de l'alumine et de la silice, en augmentant ou en diminuant la proportion de celle-ci d'après la composition de la chaux. Je mélange les deux matières et j'ajoute de l'eau de manière à obtenir une pâte ayant la consistance du mortier ordinaire ; je découpe cette pâte en morceaux réguliers ; ceux-ci sont desséchés soit à l'air, soit artificiellement, puis ils sont cuits dans des fours où ils sont soumis à l'action du feu comme cela est usité généralement pour la fabrication de la chaux. Le degré de cuisson dépend de la dimension et de la qualité des morceaux ; mais on reconnaît que ceux-ci ont été exposés assez longtemps au feu quand on peut les casser à la main. En outre de la craie, de la pierre et de toute autre substance comme il est dit ci-dessus, la chaux ordinaire éteinte ou pulvérisée peut être aussi employée ; mais dans ce cas, le mélange n'a pas besoin d'être cuit à une température aussi élevée. La quantité d'argile qui doit être ajoutée à la craie dépend de sa qualité. Mais je trouve, en général, que la meilleure proportion est de 21 à 22 mesures d'argile pour cent mesures de craie. »

On voit que les patentes de Apsdin et de M. Maurice Saint-Léger se ressemblent beaucoup ; celle-ci est cependant bien plus claire et plus explicite ; mais elle diffère de celle de Apsdin par le degré de cuisson. M. Saint-Léger voulait, en effet, faire simplement de la chaux hydraulique, tandis que Apsdin indique que les matières cuites doivent être broyées et réduites en poudre par des moyens mécaniques et non par extinction. Quoi qu'il en soit, les travaux de Vicat ont certainement contribué aux perfectionnements de l'idée d'Apsdin ; M. Pasley, officier anglais, qui écrivit plusieurs ouvrages sur le ciment et fit

faire à cette industrie de réels progrès s'inspira des recherches de Vicat. Dans un ouvrage publié en 1828, il rappelle que M. Frost est l'initiateur de Vicat en Angleterre ; or, Frost a établi la première fabrique de ciment qui ait donné des résultats vraiment sérieux, en 1825, à Swanscombe.

Un fils d'Apsdin installa quelques année plus tard une usine à Nortfleet. En 1850, il n'existait encore que quatre usines produisant du ciment Portland ; l'irrégularité des produits et la concurrence que faisait au nouveau ciment le ciment Romain de Parker entravaient son développement. Ce fut seulement vers 1860 que, à la suite des travaux de M. Grant, qui étudia spécialement les conditions à imposer pour la réception des ciments, la fabrication prit de l'extension et le Portland se substitua alors rapidement à tous les autres produits employés jusqu'alors dans les travaux publics.

On commença à employer le Portland en France vers 1850.

Accepté d'abord avec méfiance à cause de sa composition chimique qui le classait parmi les chaux limites si redoutées des constructeurs, dit M. Durand Claye (1), il s'est bientôt fait remarquer par des qualités spéciales, surtout dans les travaux maritimes pour lesquels il a acquis un privilège exclusif sur les côtes de l'Océan et de la Manche.

L'usine de Boulogne-sur-mer, antérieurement occupée de la fabrication des ciments rapides et affectée ensuite par son propriétaire, M. Dupont, exclusivement à la préparation du Portland, a contribué par l'excellence et la régularité de ses produits à en propager l'emploi.

C'est en effet vers 1850 que MM. Dupont et Demarle commencèrent à livrer des quantités assez importantes de ciment Portland ; leurs premiers essais datent de 1846, mais la fabrication ne devint régulière que vers 1848-1850. Ce fut M. Demarle qui trouva le moyen d'utiliser les gisements de craie marneuse découverts par Vicat et qui alimentent encore aujourd'hui l'usine de Boulogne-sur-Mer. Il sut, dans un espace de temps relativement court, amener la fabrication, en ce qui concerne le traitement des matières premières et le dosage notamment, à un tel

(1) *Chimie appliquée à l'art de l'Ingénieur* (Baudry et C[ie] éditeurs).

état de perfection que ses procédés sont suivis encore aujourd'hui sans qu'on y ait, pour ainsi dire, rien changé.

Les fabriques de ciment sont restées très peu nombreuses en France jusqu'en 1880 ; à partir de cette époque, il s'en est crée un certain nombre.

En Allemagne, les premières usines de ciment Portland datent de 1852; depuis 1875, les progrès de cette industrie ont été très rapides et l'Allemagne fabrique aujourd'hui à elle seule près de la moitié de la production totale.

Il existe maintenant des fabriques de ciment en Belgique, en Russie, en Danemark, en Suède, en Portugal, en Roumanie, au Japon, aux Etats-Unis. On peut estimer la production annuelle à cinq millions de tonnes environ.

De nombreuses recherches scientifiques ou pratiques ont été faites sur le ciment Portland et ont contribué à perfectionner sa fabrication et à développer son emploi. Parmi les ingénieurs et les savants qui ont eu une réelle influence sur les progrès de cette industrie, on peut citer : Paxley, Grant, Redgrave, Reid, Scott en Angleterre ; Péttenkofer, Fuchs, Knapp, Bauchinger, Michaëlis, en Allemagne, Bélélubsky, Schuliatschenko en Russie, Tetmayer en Suisse, Castanheira das Neves en Portugal.

En France, jusque dans ces dernières années, on n'avait, pour ainsi dire, rien ajouté aux célèbres recherches de Vicat et les théories émises par Rivot et Chatoney et par Frémy restaient de simples hypothèses n'ayant aucun caractère de certitude. M. H. Le Chatelier a été le premier à établir des données positives sur la constitution des chaux et des ciments et c'est à lui que l'on doit les seules connaissances exactes que nous ayons sur la prise et le durcissement des mortiers.

Les ingénieurs des ponts-et-chaussées appelés à diriger les grands travaux maritimes exécutés dans ces cinquante dernières années ont beaucoup contribué à améliorer la fabrication du ciment Portland en exerçant sur les fournitures un contrôle judicieux et constant. Les observations recueillies par MM. Pasquier-Vauvilliers, Leblanc, Vaudrey, Quinette de Rochemont, Alexandre, Thurninger, Coustolle, Viennot, etc., ont été très utiles pour déterminer de meilleures conditions d'emploi des

ciments. Le cahier des charges de M. Guillain, élaboré à la suite de recherches extrêmement intéressantes de M. Vétillart à Calais a fait faire aux usines françaises des progrès considérables en attirant l'attention des fabricants sur des points qu'ils avaient trop négligés jusqu'alors. On doit encore à M. Guillain la création du laboratoire de Boulogne placé sous la direction de M. Féret dont les travaux sont justement appréciés. Le laboratoire de l'Ecole des ponts-et-chaussées dirigé par M. Durand-Claye et maintenant par M. Debray a rendu aussi les plus grands services.

Enfin, beaucoup de fabricants ont eu sur cette industrie une influence décisive, nous n'en pouvons citer que quelques-uns : Demarle, Famchon, en France, Dickerhoff, Schott, Mayer, en Allemagne, Leslie, Maclay, aux Etats-Unis, etc.

2. Fabrication. — *Matières premières.* — Le ciment Portland est le produit de la cuisson jusqu'au commencement de vitrification d'un mélange intime, en proportions convenables, de carbonate de chaux et d'argile ; le mélange doit être physiquement et chimiquement homogène dans toutes ses parties.

Les matières premières destinées à fournir le carbonate de chaux et l'argile peuvent être assez variées ; tantôt ce sont des marnes argileuses qui contiennent à peu près dans la proportion voulue les deux éléments essentiels et avec lesquelles il suffit de mélanger une petite quantité d'argile. Dans d'autres cas, on emploie un calcaire composé presque entièrement de carbonate de chaux que l'on mélange avec de l'argile pure ou une marne très argileuse.

Selon que le traitement des matières se fait par voie sèche ou par voie humide, les qualités qu'elles doivent présenter peuvent être assez différentes ; dans le premier cas, elles doivent être très pures et homogènes puisqu'elles passent entièrement dans la fabrication sans qu'il soit possible pratiquement d'en rien éliminer. Dans le second cas on peut employer des calcaires ou des argiles contenant des matières dures qui sont retenues dans les appareils de délayage ; ainsi la craie mélangée de silex ne présente pas d'inconvénients quand on la traite par voie

humide : il serait impossible de l'utiliser dans les usines qui se servent du procédé à sec.

Préparation par voie humide. — La manière d'opérer la plus simple et la moins coûteuse consiste à délayer la craie et l'argile avec une grande quantité d'eau ; la boue calcaire produite par cette opération est envoyée dans des bassins où elle se décante, puis on la dessèche complètement.

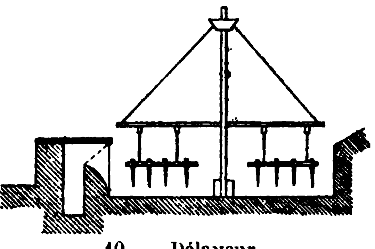
Cette préparation de la pâte est usitée dans toutes les usines du Boulonnais, et dans quelques usines du centre ; elle est générale dans les usines anglaises et belges, et dans celles du nord de l'Allemagne.

Dans le Boulonnais les calcaires contiennent, en moyenne, une quantité d'argile à peu près suffisante ; mais leur composition est très irrégulière ; les carrières ne présentent aucune stratification et, quel que soit le soin que l'on puisse prendre, il serait impossible d'obtenir un résultat, même médiocre, en cuisant le calcaire tel qu'il est extrait. La proportion d'argile varie de 9 à 30 %.

Ces calcaires argileux étant facilement délayables, on les réduit en bouillie claire de manière à mélanger ainsi tous les produits de la carrière. Pour faire l'appoint de la quantité d'argile nécessaire, on ajoute à la craie une petite proportion d'argile du Gault que l'on trouve en grande quantité dans le pays. Voici la composition moyenne de la craie argileuse et celle de quelques échantillons d'argile.

	Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Perte au feu	Produits non dosés	Total	Observations
Craie nº 1.	36,60	8,70	1,90	52,25	0,30	0.15	»	0.10	100,00	Analyses faites
nº 2.	13.60	5,30	1,40	78,90	0,30	0.20	»	0,30	100,00	après calcination
nº 3.	7,40	3,47	0,83	87,82	0,27	0,18	»	0,03	100,00	au rouge blanc.
Argile nº 1.	55,10	14,25	10,20	1,56	2,34	3,08	13,40	0,07	100,00	
nº 2.	63,60	8,90	4,40	7,84	1,95	2,09	10.85	0,37	100,00	
nº 3.	44,30	16,02	3.98	7.84	2,41	2,70	20.85	2,00	100,00	
nº 4	50,45	18,70	2,80	5.70	2,36	1,47	16,55	1.57	100,00	
nº 5.	57,00	19,23	7,57	2,35	1,50	0,20	11,80	0,35	100,00	
nº 6.	46,30	15,11	4,19	10,97	2,34	2,48	18,00	0,61	180,00	

Le délayage s'opère dans de grands bassins circulaires dans lesquels tournent des herses armées de fortes dents en acier (*fig.* 10) ; l'eau arrive à la partie supérieure ; on la règle de manière que la pâte obtenue soit assez claire ; sa teneur en eau est de 50 à 60 °/₀. La pâte sort du délayeur par un trop plein dont l'orifice est fermé par un cadre incliné garni d'une toile métallique à mailles très serrées (n° 50,324 mailles par centimètre carré). Les sables et les parties qui se délayent difficilement sont ainsi retenus dans le délayeur et il ne reste en suspension dans la pâte que les parties absolument impalpables. Pour obtenir une plus grande pureté, on élimine encore toutes les parties d'un volume appréciable qui auraient pu passer à travers les tamis, en faisant circuler la pâte dans des appareils spéciaux.

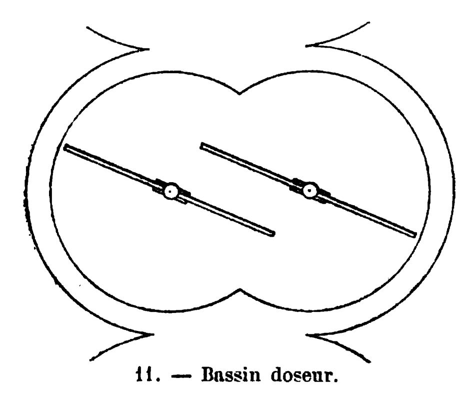

10. — Délayeur.

Toutefois ces appareils, peu employés d'ailleurs, donnent des résultats assez imparfaits ; il est préférable de délayer avec une plus grande quantité d'eau et de faire passer la pâte à travers des tamis plus fins.

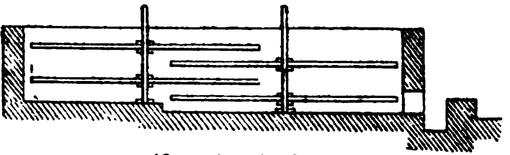
Dosage. — Quand on se sert de craie et d'argile, c'est-à-dire d'éléments ayant une composition à peu près constante, le dosage se fait directement en pesant ou en mesurant les deux matières avant de les jeter dans le délayeur. Dans toutes les usines anglaises, belges et allemandes, on se contente de régler ainsi le mélange et il n'existe aucun moyen de corriger le dosage quand la pâte est sortie du délayeur ; ce procédé est évidemment imparfait, car les matières premières ont rarement une composition absolument constante ; la teneur en eau surtout peut être assez variable ; enfin des erreurs de dosage sont toujours possibles et on ne peut en atténuer l'importance que par un contrôle très fréquent de la composition de la pâte.

Les bassins de dosage dont on se sert en France évitent ces inconvénients et permettent d'obtenir très simplement une pâte de composition tout à fait régulière.

Ces bassins doseurs sont constitués par de grandes cuves cylindriques de 100 à 150 m³ de capacité ; des arbres verticaux munis de palettes en bois permettent d'entretenir une agitation suffisante pour assurer le mélange parfait de toute la pâte qu'ils contiennent (*fig.* 11 et 12). Quand les agitateurs ont fonctionné pendant un certain temps, on prélève un échantillon de pâte que l'on porte au laboratoire où il est analysé rapidement. Si la dose d'argile est trop faible, on introduit dans le bassin doseur une quantité déterminée de pâte très argileuse dont on connaît la teneur en argile ; on fait fonctionner de nouveau les agitateurs et on prélève un nouvel échantillon de pâte ; celui-ci est analysé et si le dosage est convenable la pâte est prête à être expédiée. Si le résultat cherché n'est pas atteint, on recommence l'opération. On conçoit que ce système puisse donner d'excellents résultats, car, avec des précautions suffisantes, on est assuré d'obtenir les conditions essentielles de la production d'un ciment de bonne qualité, c'est-à-dire la régularité de composition et l'homogénéité.



11. — Bassin doseur.



12. — Bassin doseur.

L'analyse de la pâte se fait rapidement et on se contente de doser soit l'argile (silice, alumine, oxyde de fer), soit le carbonate de chaux. Dans le premier cas, la pâte desséchée à 100° est attaquée par l'acide chlorhydrique étendu, puis on neutralise l'excès d'acide par l'ammoniaque ; on filtre, on lave, on sèche et on calcine le précipité. L'opération demande une heure environ. Dans le second cas, on dose l'acide carbonique en volume à l'aide d'un des nombreux appareils volumétriques qui existent pour faire ce dosage ; ou bien on fait le dosage de

l'acide carbonique en poids ; d'après la quantité d'acide carbonique trouvée on calcule la teneur en carbonate de chaux. Le dosage de l'acide carbonique en volume est très rapide, mais il présente moins d'exactitude.

Le dosage de la pâte est compris entre 20 et 24 % d'argile ou entre 80 et 76 % de carbonate de chaux ; dans chaque usine on cherche à conserver toujours le même dosage à 0,5 % près. Il n'est pas possible de dire le dosage qui convient le mieux, car cela dépend des matières premières et de la manière dont elles sont traitées. Le dosage théorique devrait être de 80 à 81 % de carbonate de chaux et de 19 à 20 % d'argile ; mais le moindre excès de chaux étant très nuisible il y a intérêt à se tenir un peu au dessous de cette limite extrême ; plus les procédés de dosage et de préparation des matières seront parfaits et plus on pourra s'en approcher ; c'est pourquoi les ciments du Boulonnais sont un peu moins riches en argile que ceux d'Angleterre ou d'Allemagne.

Procédé Goreham. — Dans la préparation de la pâte, par le procédé Goreham, on n'emploie pour le délayage que 40 à 45 % d'eau. La pâte est très épaisse et doit sortir du délayeur en traversant simplement une grille dont les barreaux sont espacés de 0,01 environ ; il en résulte que des grains de calcaire assez gros restent dans la pâte ; pour arriver à une homogénéité et à une finesse suffisantes, on fait passer celle-ci dans des meules appelées meules humides et dans lesquelles tous les grains un peu volumineux sont broyés finement. Ces meules sont disposées généralement de telle sorte que la meule inférieure tourne tandis que la meule supérieure est fixe ; le mécanisme peut être mis ainsi plus facilement à l'abri de l'eau. Dans quelques usines, on remplace les meules par des tubes-broyeurs analogues à ceux dont, nous parlerons plus loin à propos de la mouture du ciment (*fig.* 53 et 54).

Ce procédé peut être assez satisfaisant avec des matières très pures, mais il serait défectueux si les matières premières contenaient du sable qui ne pourrait pas être retenu dans le délayeur. On ne l'utilise d'ailleurs que dans le cas où la pâte

est envoyée directement aux fours-séchoirs ; car si elle devait passer par les bassins de repos, il n'y aurait plus grand intérêt à délayer avec 10 ou 15 % d'eau en moins, et l'avantage que l'on pourrait en retirer ne compenserait pas les frais d'installation et d'entretien des meules humides.

Dans certaines usines, on emploie beaucoup d'eau pour le délayage, mais le délayeur n'est pas muni de tamis ; la pâte tombe dans un bassin dans lequel tourne un tamis cylindrique à travers lequel elle doit passer ; les parties non délayées sont éliminées, reprises par une chaîne à godets et déversées dans des meules humides. Cette manière de faire est rationnelle, mais ne peut toujours convenir que si les matières premières ne contiennent pas de sable.

Procédé Berggren. — Depuis quelque temps, on utilise en Danemark un système dû à M. Berggren, directeur de l'usine Cimbria. Ce système permet d'obtenir immédiatement de la pâte molle pouvant être moulée en briques. La craie et l'argile passent dans plusieurs paires de cylindres placés les uns au dessous des autres et disposées de telle sorte que chaque paire de cylindres tourne dans un plan perpendiculaire à celui des cylindres supérieurs. Le malaxage est terminé par des meules verticales. On obtient ainsi de la pâte à 25, 30 % d'eau qui passe directement à la machine à briques et peut être portée aussitôt aux séchoirs. C'est une assez grande simplification de main-d'œuvre et ce procédé convient aussi très bien dans les pays où la température ne permet pas de compter sur le séchage à l'air ; mais la force employée par tous ces appareils est très grande et le mélange ne peut pas avoir la perfection que l'on obtient avec les pâtes délayées à grande eau.

Préparation par voie sèche. — Quand les matières sont trop dures pour pouvoir se délayer, on doit les réduire en poudre pour pouvoir les mélanger intimement; on emploie alors la méthode par voie sèche qui est plus complexe que le traitement par voie humide et demande des installations plus considérables.

Les pierres sortant de la carrière contiennent presque toujours un peu d'eau, et il est nécessaire tout d'abord de les des-

sécher complètement ; on emploie dans ce but des séchoirs trés variés ; nous en énumérerons seulement quelques-uns. Les plus simples sont constitués par des fours verticaux semblables aux fours à chaux ; les gaz chauds sont envoyés à la partie inférieure du four, soit par un gazogène, soit par des foyers placés latéralement. MM. Schmidt et C[ie], de Copenhague, ont perfectionné ce système de four en réalisant l'introduction automatique des matières et en disposant convenablement les conduits amenant les gaz et l'air de manière à obtenir une utilisation aussi parfaite que possible de la chaleur. Ce four ne peut être employé que pour le séchage des pierres dures et de dimensions assez régulières ; quand les calcaires peuvent s'effriter ou contiennent beaucoup de menus on a recours à d'autres dispositions ; ce sont tantôt les canaux de Fellner et Ziegler dont nous aurons à parler plus tard, tantôt des plans inclinés chauffés en dessous et sur lesquels descendent les matières à sécher, tantôt enfin des cylindres inclinés parcourus par des gaz chauds tandis que la matière entraînée par le mouvement de rotation de l'appareil descend en sens inverse.

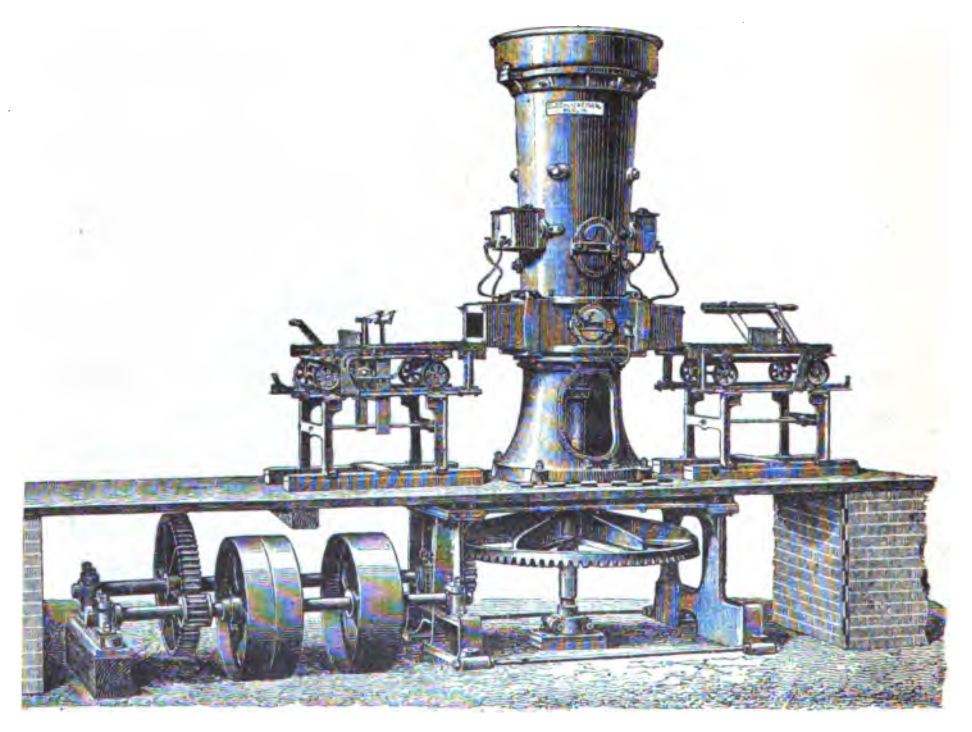
Les matières premières une fois sèches sont concassées et réduites en poudre fine par des appareils identiques à ceux que l'on emploie pour le ciment cuit ; nous les décrirons plus loin.

Le mélange des poudres peut se faire de diverses manières. Si les pierres ont une composition s'écartant peu du dosage normal, elles se mélangent suffisamment en passant par les divers appareils de mouture et avec des analyses fréquentes on peut se maintenir assez facilement au dosage cherché.

Quand on a à traiter deux pierres de composition très différente, on les broie à part et chaque poudre est envoyée dans des silos séparés ; de là elles sont transportées à l'appareil mélangeur dont le type le plus connu est le mélangeur Jochum. Cet appareil se compose de deux entonnoirs fermés à la partie inférieure par un plateau tournant ; l'écartement entre le plateau et l'entonnoir peut être modifié à l'aide d'une vis ; la poudre contenue dans l'entonnoir s'écoule ainsi plus ou moins vite et on peut régler l'écoulement très exactement. Des entonnoirs, les poudres tombent dans une vis où s'opère le mélange ;

elles sont en même temps entraînées et déversées dans une autre vis ou dans un malaxeur où se fait l'addition d'eau et la réduction en pâte.

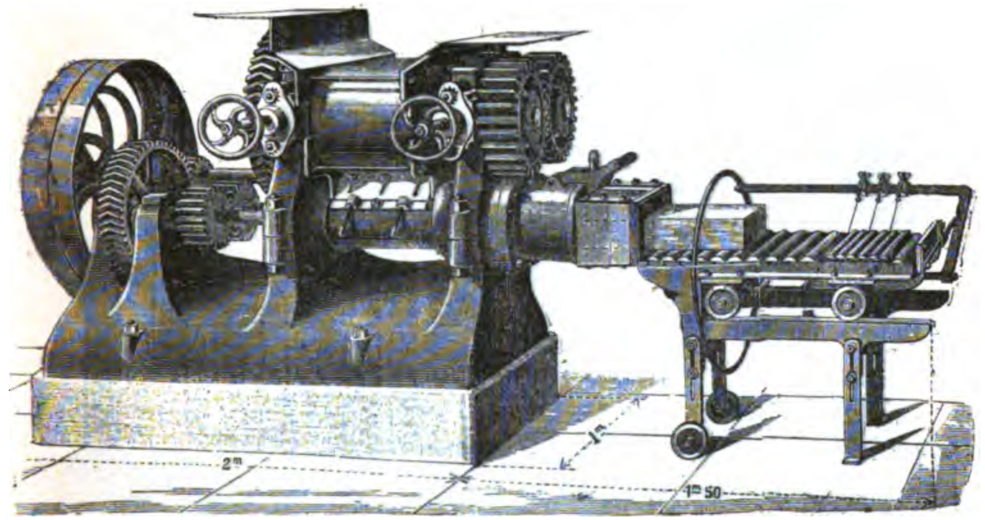
La poudre humectée est toujours moulée en forme de briques ; cette opération se fait de deux façons. Quand la pâte est malaxée avec une quantité d'eau variant de 25 à 35 %, on obtient de la pâte molle, plastique, que l'on peut faire passer à la filière comme la terre à brique ordinaire. Les machines généralement employées sont constituées simplement par un cylindre vertical dans lequel tourne un arbre muni de palettes ; à la partie inférieure la pâte sort par une filière, elle est entraînée sur un chariot et découpée en morceaux réguliers. Ces machines produisent 3 à 4000 briques à l'heure ; elles sont aussi employées dans les usines travaillant par voie humide mais où la pâte sortant des bassins de repos est mise en briques avant le séchage



13. — Malaxeur vertical.

(*fig*. 13). Si l'on veut obtenir une pâte un peu plus ferme conte-

nant seulement 20 à 25 % d'eau, il faut avoir recours aux machines à cylindres et hélices (*fig.* 14). La pâte broyée et laminée par les cylindres est reprise par les deux hélices placées au

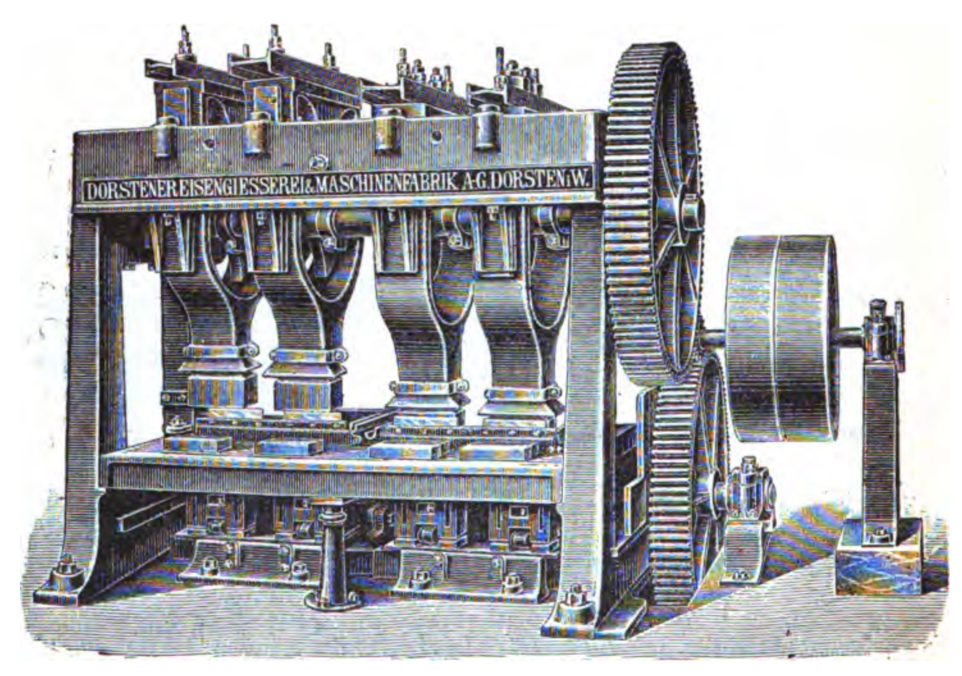


14. — Machine à briques en pâte molle.

dessous, celles-ci la malaxent et la chassent à travers la filière. On obtient ainsi des briques plus fermes qu'avec les malaxeurs verticaux, mais la production est un peu moindre.

Dans certains cas, il est avantageux d'obtenir des briques contenant assez peu d'eau pour qu'on puisse les porter directement aux fours sans passer par les séchoirs ; on humecte alors la poudre avec 8 à 10 % d'eau seulement. Pour agglomérer cette poudre il faut des machines très puissantes, la plus employée est la presse de Dorsten (*fig.* 15). Cette presse se compose de quatre pilons très lourds qui sont soulevés par des cames et agissent uniquement par choc. Dans d'autres presses, les pilons au lieu de donner un seul coup retombent plusieurs fois sur la brique et à chaque fois d'une hauteur plus grande. Signalons encore une presse à plateau tournant et dans laquelle les pilons au nombre de 8 à 10 sont disposés sur une portion de la circonférence du plateau ; la matière humide est introduite dans les alvéoles du plateau et par le mouvement de rotation elle est soumise successivement au choc de chaque pilon.

Ces presses à choc produisent des briques qui sont généralement feuilletées et dont la dureté est assez faible. On obtient des

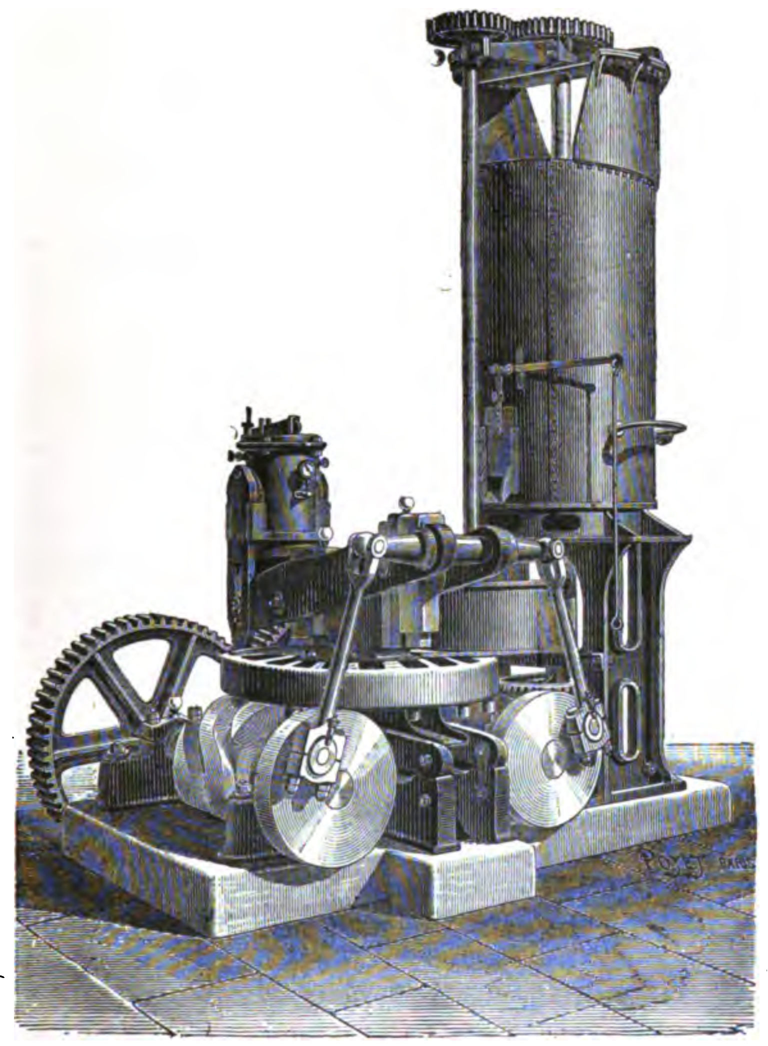


15. — Presse Dorsten.

briques plus solides et plus compactes avec les machines agissant par pression ; les presses hydrauliques sont peu employées. La presse Biétrix donne de bons résultats bien que son usage ne soit pas répandu dans les usines de ciment ; elle est surtout utilisée pour la fabrication des agglomérés de charbon (*fig.* 16). Dans cette machine la compression est produite par un piston supérieur et un piston inférieur agissant l'un après l'autre de sorte que la briquette reçoit sur les deux faces une pression égale pouvant atteindre 150 à 300 kilogrammes par centimètre carré. Le démoulage se fait sur un tablier à bascule ou sur une toile sans fin placée directement sous la machine. Le remplissage des alvéoles est obtenu au moyen d'un distributeur ordinaire, alimenté par un appareil quelconque de préparation de la pâte.

En dehors des deux procédés généraux de traitement des matières par voie sèche et par voie humide, il existe des com-

binaisons des deux systèmes ; tantôt on réduit la craie seulement en poudre, tandis que l'argile est délayée ; on malaxe



16. — Presse Bietrix.

ensuite les deux matières en les mélangeant en proportions convenables ; tantôt on traite une partie des matières par voie sèche, une autre par voie humide et on les mélange finalement de manière à obtenir une pâte de consistance convenable pour être moulée en briques.

Enfin le procédé Vicat est encore une variante de la méthode par voie sèche. Le calcaire est cuit dans des fours à chaux ordinaires; la chaux est éteinte et blutée; d'autre part, on utilise comme pierre argileuse un calcaire qui, par une cuisson modérée, donne un ciment prompt; en mélangeant avec ce ciment une proportion déterminée de chaux en poudre, on obtient une sorte de mortier avec lequel on forme des briques qui durcissent en peu de temps et se trouvent ainsi desséchées rapidement. Ce traitement qui, avec des matières premières appropriées, présente certains avantages, est utilisé seulement par la société Vicat.

Séchage. — A la sortie des bassins doseurs, la pâte est envoyée dans de grands réservoirs d'une contenance de 1000 à 1 500 mètres cubes appelés bassins de repos; elle y séjourne 2 à 3 mois et elle perd ainsi une partie de son eau par évaporation et par décantation. Quand elle est suffisamment plastique pour qu'on puisse la prendre à la pelle, on la charge en brouettes ou en wagonnets et on la conduit aux séchoirs ; elle contient alors 25 à 35 °/₀ d'eau.

Les séchoirs sont constitués par des aires chauffées généralement par la chaleur dégagée de fours à coke. Les fours sont chargés tous les jours et les produits de la distillation passent dans des carneaux aboutissant à une cheminée centrale ; les carneaux sont recouverts de pièces en terre réfractaire ou de carreaux en fonte sur lesquels on étend la pâte à sécher. Quand la pâte est complètement sèche, ce qui demande 48 heures environ, on la divise en fragments réguliers et on la porte aux fours.

Ce système était le seul en usage dans les usines du Boulonnais jusqu'en 1875. A cette époque, M. Famchon introduisit en France, en le modifiant, le procédé employé en Angleterre depuis plusieurs années et qui consistait à utiliser la chaleur perdue des fours à cuire pour le séchage de la pâte; nous décrirons plus loin ce système de four. La pâte est envoyée directement sur le four à la sortie des bassins doseurs, sans avoir besoin de passer par les bassins de repos.

Enfin, quand la cuisson s'opère dans les fours Hoffmann, la pâte est reprise à la sortie des bassins de repos pour être moulée sous forme de briquettes qui sont desséchées dans des séchoirs spéciaux à flamme directe, puis portées aux fours.

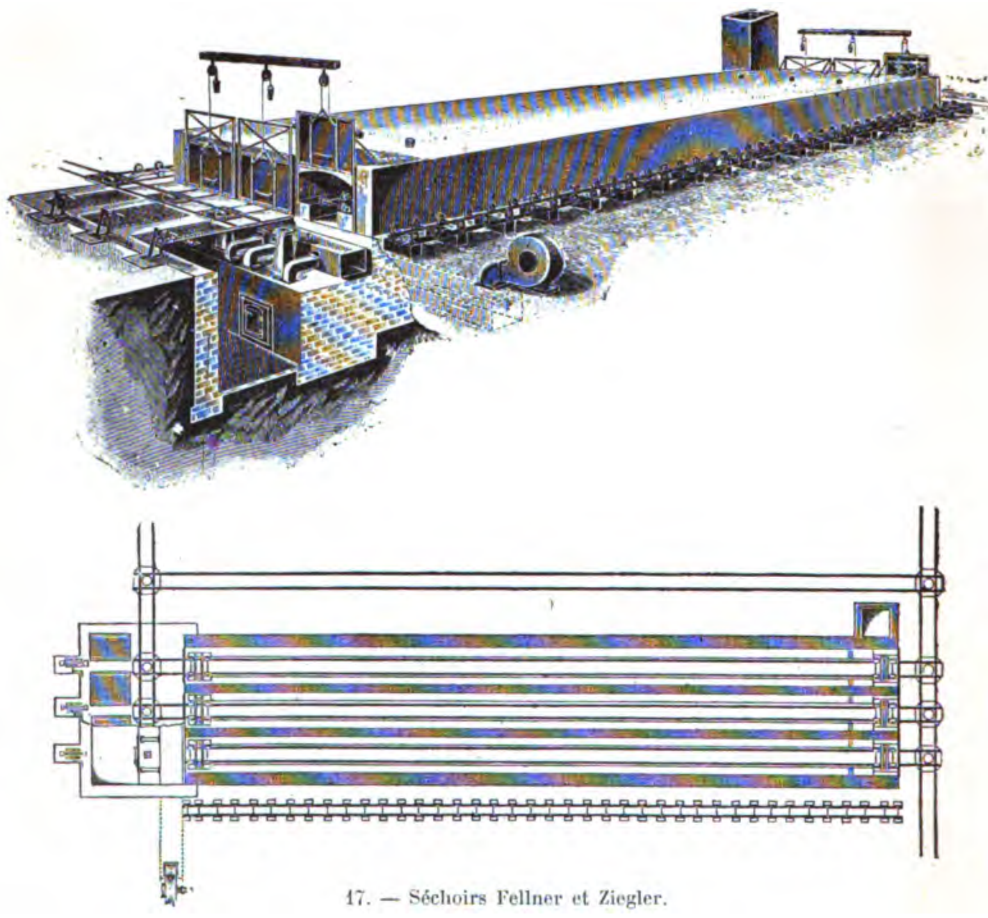
Les briques en pâte molle préparées par voie sèche ou demi-humide sont desséchées soit sur les fours à cuire, et nous décrirons les procédés employés à propos de la cuisson, soit dans des séchoirs spéciaux. On a utilisé pendant longtemps des plates-formes chauffées par dessous par les gaz de fours à cokes; les gaz parcouraient les canaux recouverts de dalles en fonte ou en réfractaire et sur lesquelles étaient disposées les briques. Ce système tend à disparaître ; le séchoir le plus employé actuellement est celui de Fellner et Ziégler; il se compose de plusieurs canaux dans lesquels circulent des wagonnets chargés de briques. Les gaz chauds provenant de gazogènes pénètrent dans les canaux et les parcourent en sens inverse des wagonnets. Les matières s'échauffent ainsi graduellement et se dessèchent au fur et à mesure de leur avancement dans les canaux. Des portes munies de contre-poids ferment les canaux et de temps en temps on extrait un wagonnet en même temps que l'on en introduit un autre chargé de briques humides à l'extrémité opposée (*fig.* 17).

Dans les premiers types de séchoirs à canaux les wagonnets construits à la manière ordinaire circulaient sur des rails ; il en résultait une usure très importante du matériel et un fonctionnement défectueux des wagonnets ; on a remplacé ceux-ci par de simples plates-formes qui roulent sur une série de galets en fonte disposés dans les canaux ; à la sortie, la plate-forme est reçue sur un truc mobile sur lequel elle est envoyée aux fours ou bien elle est placée de nouveau sur une autre voie munie de galets.

Ce système de séchoir est très coûteux comme installation, mais son fonctionnement est assez simple et permet de réaliser une notable économie de main-d'œuvre puisque la manipulation des briques est supprimée. La quantité de charbon nécessaire pour sécher la pâte correspondant à une tonne de ciment ne dépasserait pas 30 kilogrammes.

Le séchoir de Moller et Pfeifer est un perfectionnement du séchoir à canaux. Dans le système Fellner et Ziégler la vapeur

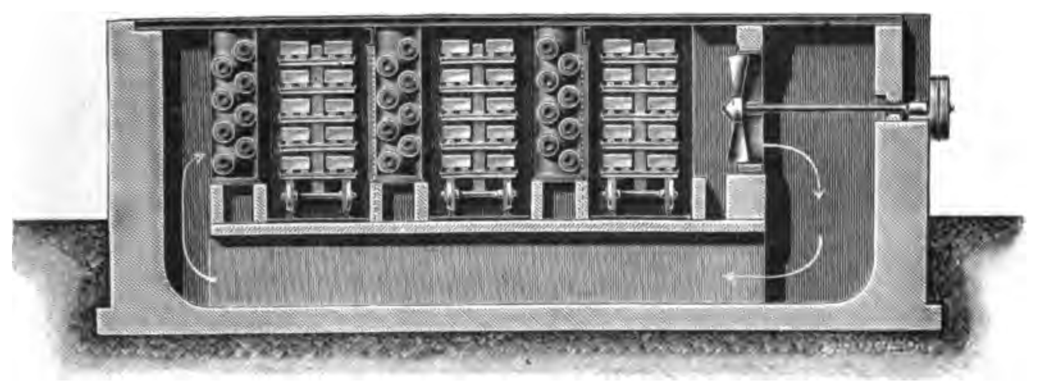
d'eau qui se dégage des briques peut se condenser sur les matières qui entrent dans le séchoir et qui se trouvent pendant un



17. — Séchoirs Fellner et Ziegler.

certain temps dans un milieu à température peu élevée ; le séchoir Moller et Pfeifer, non seulement remédie à cet inconvénient, mais utilise la vapeur d'eau produite par le séchage. A cet effet des ventilateurs disposés latéralement aspirent continuellement la vapeur d'eau et la dirigent dans des appareils où elle circule ; ce sont des tuyaux à ailettes qui jouent le rôle de véritables calorifères ; l'air chaud circulant autour de ces tubes est envoyé dans les canaux et concourt au séchage ; l'eau condensée se trouve à une température assez élevée et peut être utilisée (*fig*. 18).

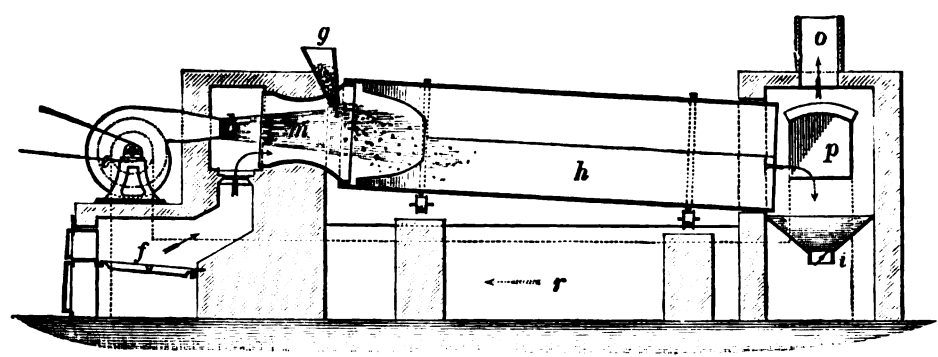
MM. Moller et Pfeifer construisent aussi un séchoir pour matières premières composé d'un cylindre tournant autour de son



18. — Séchoir Moller et Pfeifer.

axe ; un ventilateur fait passer un courant d'air chaud dans le cylindre (*fig.* 19).

Le séchoir Cummer est utilisé aussi dans le même but et il

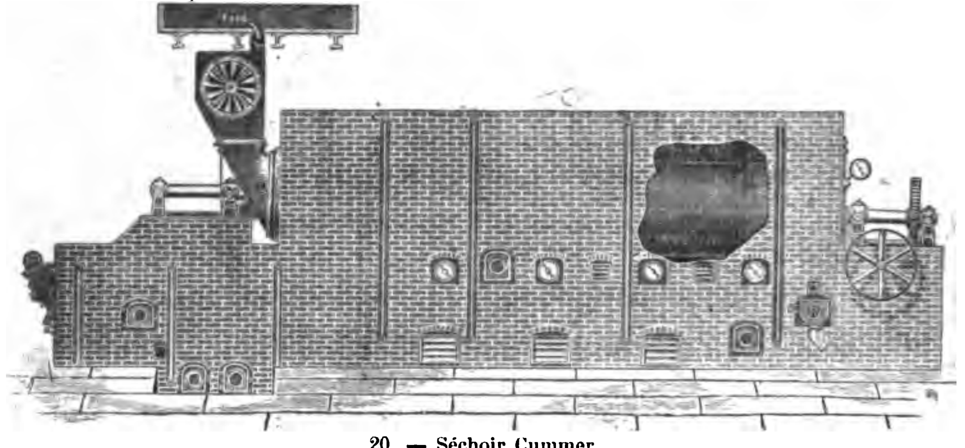


19. — Séchoir Moller et Pfeifer.

présente des dispositions analogues ; mais le principe de cet appareil est basé sur l'introduction d'air chaud dans le cylindre par des ouvertures ménagées dans la paroi même de celui-ci. Les gaz très chauds provenant d'un foyer situé à l'avant du cylindre sont mélangés avec une certaine quantité d'air arrivant par des régistres réglables à volonté ; on obtient ainsi exactement le degré de chaleur nécessaire pour obtenir la dessication des matières contenues dans le cylindre (*fig.* 20).

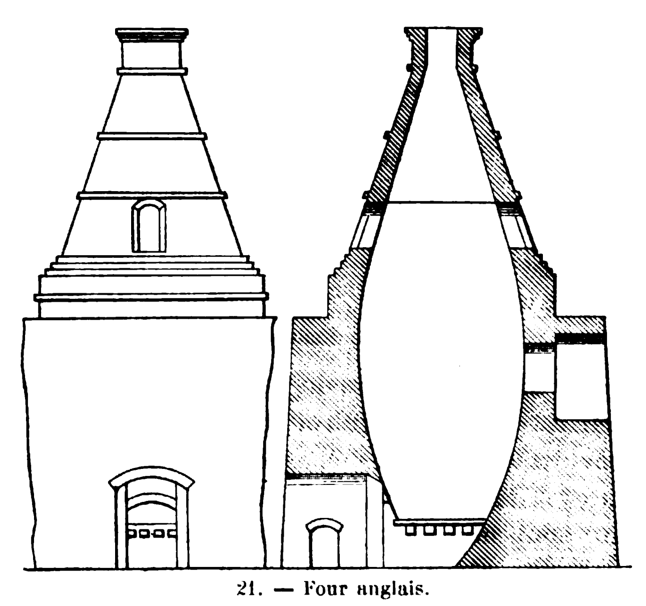
Cuisson. — Les systèmes de fours employés pour la cuisson

du ciment sont assez nombreux ; on peut les ramener à quatre types principaux : 1° Les fours ordinaires à cuisson intermittente;



20. — Séchoir Cummer.

2° les fours-séchoirs, appelés aussi fours anglais ou fours Johnson; 3° les fours continus système Hoffmann; 4° les fours coulants.

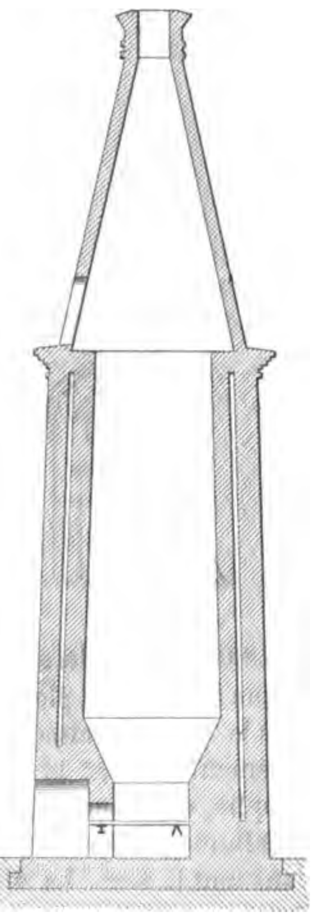


21. — Four anglais.

1° *Fours ordinaires.* — Ces fours se rapprochent beaucoup des fours à chaux ; les premiers fours construits en Angleterre, et il en existe encore beaucoup de semblables, se composaient

d'une cuve de 3 à 4 mètres de diamètre dans la partie la plus évasée et de 5 à 6 mètres de hauteur ; cette cuve était surmontée d'une cheminée en forme de tronc de cône de 4 à 6 mètres de haut. Le chargement se faisait par une porte située à peu près à la moitié de la hauteur de la cuve et par deux portes pratiquées dans la cheminée (*fig*. 21).

En Allemagne les fours verticaux intermittents ressemblent plutôt à des hauts-fournaux ; ils sont beaucoup plus élevés que les fours anglais et la cuve est absolument cylindrique ; celle-ci a 3 à 4 mètres de diamètre et 8 à 10 mètres de hauteur ; la cheminée est très haute, elle a géneralement 12 à 25 mètres (*fig* 22). Dans certaines usines, il existe des fours de très grandes dimensions ; la cuve a 7 mètres de diamètre et 15 mètres de haut ; la cheminée a 20 mètres de hauteur. A chaque fournée on retire de ces fours jusqu'à 400 tonnes de ciment.

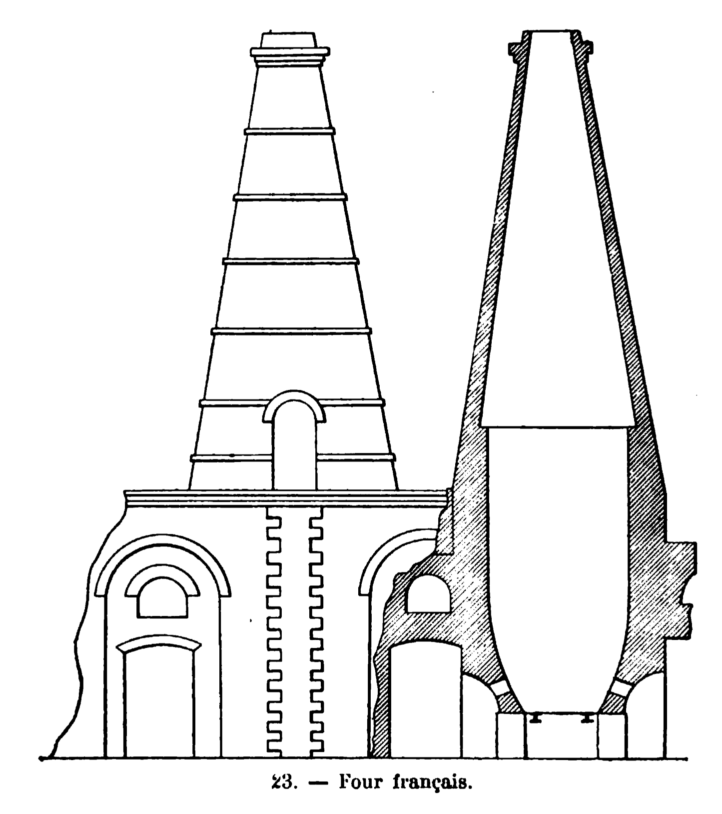


22. — Four allemand.

En France, on a utilisé pendant longtemps d'une façon à peu près exclusive des fours dits à dôme ; ils ressemblaient aux fours anglais, mais la cheminée était remplacée par un dôme et l'on avait ainsi une sorte de four à reverbère. Ce système était très défectueux ; l'orifice du dôme était généralement assez étroit, le four n'avait pas de tirage et on obtenait une très mauvaise utilisation du combustible. Vers 1885, on remplaça les dômes par des cheminées tronc-coniques et la forme très évasée de la cuve fut également modifiée ; les fours actuels se rapprochent beaucoup des fours allemands (*fig*. 23). On renonce d'ailleurs de plus en

plus à ce genre de four que l'on ne trouve plus que dans un petit nombre d'usines.

La cuisson s'opère de la façon suivante : On dispose le com-



23. — Four français.

bustible et la matière à cuire par couches alternatives jusqu'à ce que le four soit plein ; les couches de pâte ont toujours à peu près la même épaisseur ; les couches de charbon varient naturellement suivant la hauteur. Une fois la cuve complètement remplie, on ferme soigneusement les portes et on les lutte, puis on allume à la partie inférieure ; le feu se propage peu à peu dans tout le four. La disparition du combustible et la contraction que subit la pâte en cuisant produisent un affaissement très important de toute la masse, de sorte que la cuve ne se trouve plus remplie qu'aux trois quarts environ. Généralement on profite de cet affaissement pour remettre de nouvelles couches de matières et de combustible dans le four et on le rem-

plit de nouveau. Ces recharges peuvent être faites trois ou quatre fois jusqu'à ce que le four soit enfin complètement plein. Dans certaines usines, cependant, on ne fait pas de rechargements et l'on préfère vider le four plus rapidement pour procéder à une nouvelle cuisson.

La pâte, pendant la cuisson, est portée à une température assez élevée pour subir un commencement de vitrification (1); les morceaux, par suite du ramollissement, se collent les uns aux autres, de sorte que tout le contenu du four ne forme plus qu'une seule masse quand la cuisson est terminée. La désagrégation est produite en partie par le refroidissement et on l'achève à l'aide de ringards. Les produits de la cuisson, que l'on appelle les roches, sont extraits par la partie inférieure des fours qui est fermée par une grille à barreaux mobiles. Les roches sont répandues sur le sol et des ouvriers enlèvent toutes les parties qui n'ont pas atteint une cuisson suffisante; celles-ci sont reportées aux fours pour subir une nouvelle cuisson. L'enfournement, la cuisson et le défournement demandent 8 à 12 jours suivant la capacité du four.

La production d'un four varie de 0,5 à 1 tonne de ciment cuit par mètre cube de capacité utilisée pour la cuisson; on emploie pour cuire une tonne de ciment 230 à 300 kilogrammes de combustible; celui-ci est tantôt de l'anthracite, tantôt du coke de gaz ou du coke métallurgique.

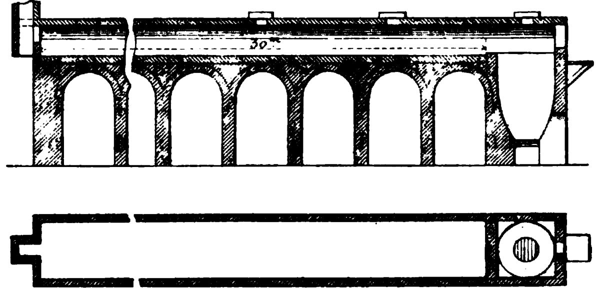
2° *Fours-séchoirs.* — Les fours-séchoirs sont semblables aux fours ordinaires en ce qui concerne toute la partie utilisée pour la cuisson, qui s'opère aussi de la même manière; mais les gaz chauds, au lieu de s'échapper directement, sont obligés de traverser un conduit horizontal assez long avant d'arriver à une cheminée qui sert pour plusieurs fours.

Le conduit que les gaz doivent parcourir a la forme d'un tunnel de même largeur que le four et dont le sol arrive au niveau

(1) On estime généralement que la température nécessaire pour déterminer le commencement de vitrification du ciment est de 1800°; de déterminations effectuées avec le pyromètre de M. Le Chatelier, il résulte que cette température est probablement un peu trop élevée et qu'elle ne doit pas dépasser 1600°.

supérieur de la cuve. Sur cette plate-forme, on coule une certaine quantité de pâte liquide telle qu'elle vient des bassins doseurs et celle-ci se trouve desséchée par la chaleur dégagée pendant la cuisson du four, de sorte qu'une fois le contenu de celui-ci cuit et extrait, on peut le remplir de nouveau avec cette pâte sèche; on la remplace par de la pâte liquide, le four est allumé et la même opération se renouvelle à chaque tournée. (*fig*. 24).

La cheminée, qui sert généralement pour un groupe de 10 à



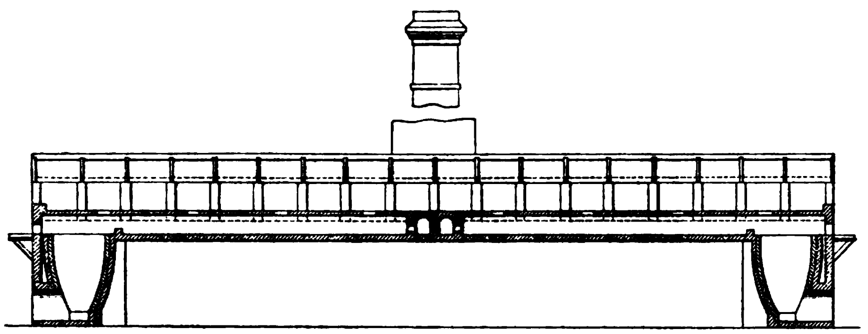
24. — Four Johnson.

12 fours, se trouve tantôt à l'extrémité des séchoirs, tantôt du côté des fours; dans ce cas, les gaz chauds, après avoir parcouru un premier conduit, reviennent à la cheminée par un conduit placé au dessus de celui-ci et que l'on peut utiliser également pour le séchage de la pâte.

M. Famchon a fait breveter un système de four-séchoir dans lequel on utilise non-seulement le sol du tunnel traversé par les gaz chauds mais aussi la partie supérieure. Sur le dessus de la voûte est établie une plate-forme en carreaux réfractaires sur laquelle on coule de la pâte liquide et qui se trouve séchée pendant la cuisson en même temps que la pâte du dessous (*fig*. 25).

Les fours-séchoirs sont employés surtout en Angleterre ; ils conviennent, en effet, pour la fabrication par voie humide. Mais s'ils présentent un avantage sérieux sur tous les autres systèmes de fours au point de vue de la main-d'œuvre, ils demandent par contre une quantité plus grande de combustible pour la cuisson. Avec de la pâte à 55, 60 % d'eau, on conçoit que le séchage ne puisse être obtenu qu'à l'aide d'un grand excès de

combustible pour la cuisson ; ou bien on doit avoir recours à des séchoirs spéciaux et l'avantage du four disparaît en partie. On peut bien enlever par décantation une assez grande quantité

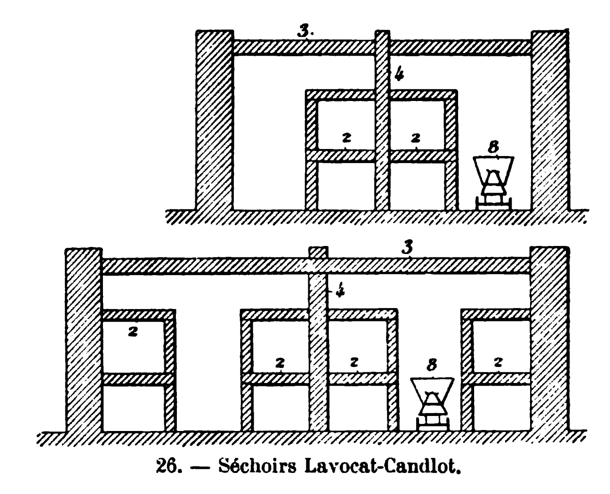


25. — Four anglais à double séchoir.

d'eau, mais c'est loin d'être suffisant. En prenant dans des bassins de repos la pâte amenée à 30 à 35 °/₀ d'eau par le séchage à l'air, on arrive à sécher la pâte dans le four sans augmenter par trop le combustible de cuisson ; mais alors l'économie de main-d'œuvre n'existe plus. Le meilleur procédé à employer avec les fours anglais consiste à préparer la pâte à l'aide du procédé Goreham ; la pâte ne contient que 40 à 45 °/₀ d'eau et peut alors être séchée dans de meilleures conditions.

MM. Lavocat et Candlot ont disposé les séchoirs de telle façon que la surface de séchage est considérablement augmentée. La nécessité de laisser au conduit des gaz une section suffisante pour que les ouvriers puissent y circuler facilement oblige à disposer la pâte uniquement sur le fond et sur le dessus du séchoir ; de plus, la voûte en maçonnerie supportant le séchoir supérieur est forcément assez épaisse et c'est une circonstance défavorable pour le séchage. MM. Lavocat et Candlot ont adopté pour la construction de ces séchoirs des plates-formes minces en ciment armé ; on obtient alors très facilement des surfaces beaucoup mieux disposées et qui permettent d'utiliser la chaleur d'une manière plus rationnelle. La plate-forme supérieure est plane et tous les points ont ainsi la même température ; elle n'a que $0^m,10$ à $0^m,12$ d'épaisseur. A l'intérieur du séchoir, des étagères placées soit sur les côtés, soit au milieu de la galerie

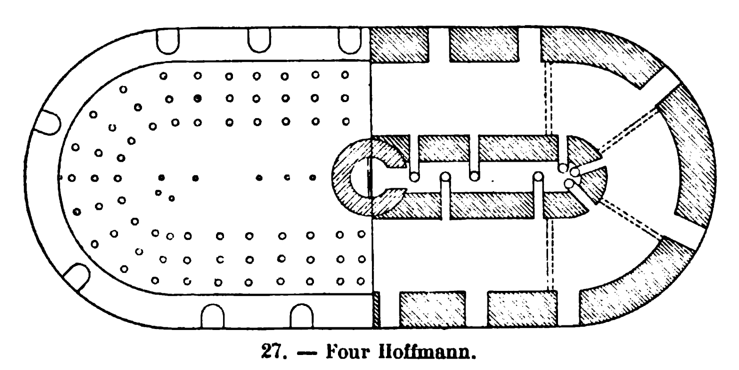
doublent la surface de séchage ; on arrive ainsi à diviser la



26. — Séchoirs Lavocat-Candlot.

pâte en plusieurs couches minces qui se trouvent séchées beaucoup plus rapidement (*fig.* 26).

3° *Four continu système Hoffmann.* — Les fours Hoffmann sont employés fréquemment pour la cuisson des briques ; les dispositions de ceux qui servent à la cuisson du ciment sont tout à fait semblables. Le four Hoffmann se compose d'une galerie circulaire ou de deux galeries parallèles réunies par deux parties en demi-cercle. Le four est divisé en sections ou compartiments au nombre de 15 à 20 ; chaque compartiment communique avec le dehors par une porte et avec la cheminée

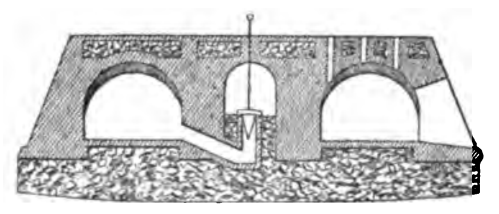


27. — Four Hoffmann.

par un conduit débouchant dans un carneau central (*fig.* 27 et 28).

Nous avons dit que la pâte destinée à être cuite dans ces fours

était moulée en briquettes ; celles-ci sont empilées méthodiquement dans le four de manière à ce que le passage des gaz puisse s'opérer facilement et suivant une direction déterminée. Quand un compartiment est rempli de briques empilées, on le ferme à l'aide d'une plaque de tôle ou en garnissant toute la section du four de fort papier ; la porte est également hermétiquement fermée. La fermeture du compartiment précédent est enlevée et le nouveau compartiment est mis en communication avec la cheminée.



28. — Four Hoffmann.

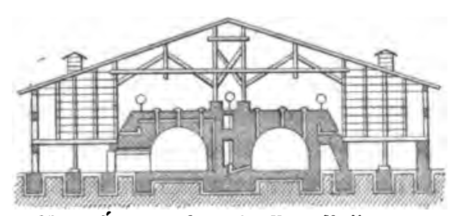
Dans un four à 18 compartiments il y en a 15 à 16 en service ; les 5 premiers sont remplis de briques empilées, la cuisson s'effectue dans le sixième ; les septième, huitième, neuvième, dixième et onzième sont remplis de ciment cuit et les trois derniers sont en vidange ; il y a en outre un compartiment que l'on remplit de briquettes.

Le combustible est introduit par la partie supérieure du four : des orifices sont ménagés dans la voûte et en empilant les briquettes on laisse au-dessous de chacun d'eux un espace vide afin que le combustible puisse tomber jusqu'au fond des puits ainsi formés. La charge de charbon se fait à intervalles réguliers et en quantité déterminée. La cuisson d'un compartiment dure 18 à 40 heures selon les circonstances ; si la cuisson d'un compartiment s'effectue en 24 heures, par exemple, il faut que pendant le même temps on vide le dernier compartiment contenant du ciment cuit et que l'on remplisse de briquettes le premier compartiment en tête ; avec une pareille marche, on ferait donc une tournée complète en 18 jours, avec un four à 18 compartiments.

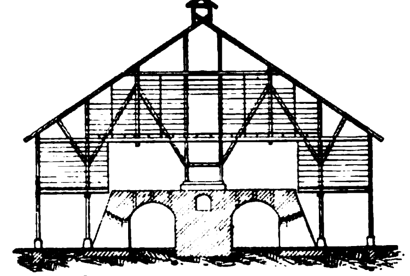
A la sortie du compartiment en cuisson, les gaz chauds passent à travers les compartiments dans lesquels sont entassées les briquettes et les échauffent, de sorte que, au moment où on commenceà mettre du charbon dans un compartiment,

celui-ci se trouve déjà à une température très élevée ; d'un autre côté, l'air arrivant du dehors passe sur le ciment cuit et s'échauffe en le refroidissant, il arrive ainsi très chaud dans le compartiment en cuisson. Il y a donc une récupération de chaleur assez complète et il en résulte une notable économie de combustible ; mais la conduite du four demande des ouvriers très expérimentés et, d'autre part, l'obligation de mouler la pâte en briquettes et leur manutention nécessitent un surcroît de main-d'œuvre qui peut compenser l'économie réalisée sur la cuisson.

Aussi ce système de four est-il employé surtout dans les usines qui travaillent par voie sèche et qui doivent, par conséquent, mouler les matières en briques. Si l'on presse les briques en les humectant avec 8 à 10 % d'eau, on peut les porter directement de la machine à briques au four. Quand les briques sont moulées en pâte molle avec 20 à 30 % d'eau, on doit les dessécher préalablement. On a songé à utiliser pour le séchage la chaleur de rayonnement du four ; diverses dispositions ont été réalisées dans ce but ; nous en reproduisons trois (*fig.* 29-30 et 31). On voit que les briques sont placées sur des étagères situées au dessus du four ; la toiture recouvrant les étagères est fermée hermétiquement ; l'air chaud s'élevant du four est obligé de traverser les étagères et s'échappe par des ouvertures placées sur les côtés.



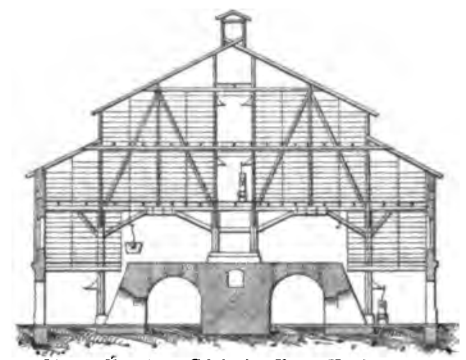
29. — Étagères-Séchoir, Four Hoffmann.



30. — Étagères-Séchoir, Four Hoffmann.

4° *Fours coulants*. — La cuisson du ciment dans des fours coulants a été réalisée pratiquement pour la première fois par M. Dietzsch en 1884. Bien avant, des tentatives avaient été faites, notamment par M. Gibbons qui, dès 1875, utilisait un

four coulant avec séchoir; mais ces essais n'avaient donné que des résultats peu satisfaisants. Les difficultés de cuire le ciment en fours coulants sont de plusieurs sortes ; le ciment devant subir un commencement de vitrification, il en résulte que les morceaux se collent les uns aux autres et forment des masses qui ne peuvent plus être extraites du four. Les matières pâteuses adhèrent fortement aux briques de la chemise et c'est un nouvel obstacle à la descente du ciment dans le four. Enfin, si la zone de cuisson se trouve un peu bas, toute la charge supérieure comprime les matières vitrifiées et facilite ainsi leur agglomération et le collage contre les parois.

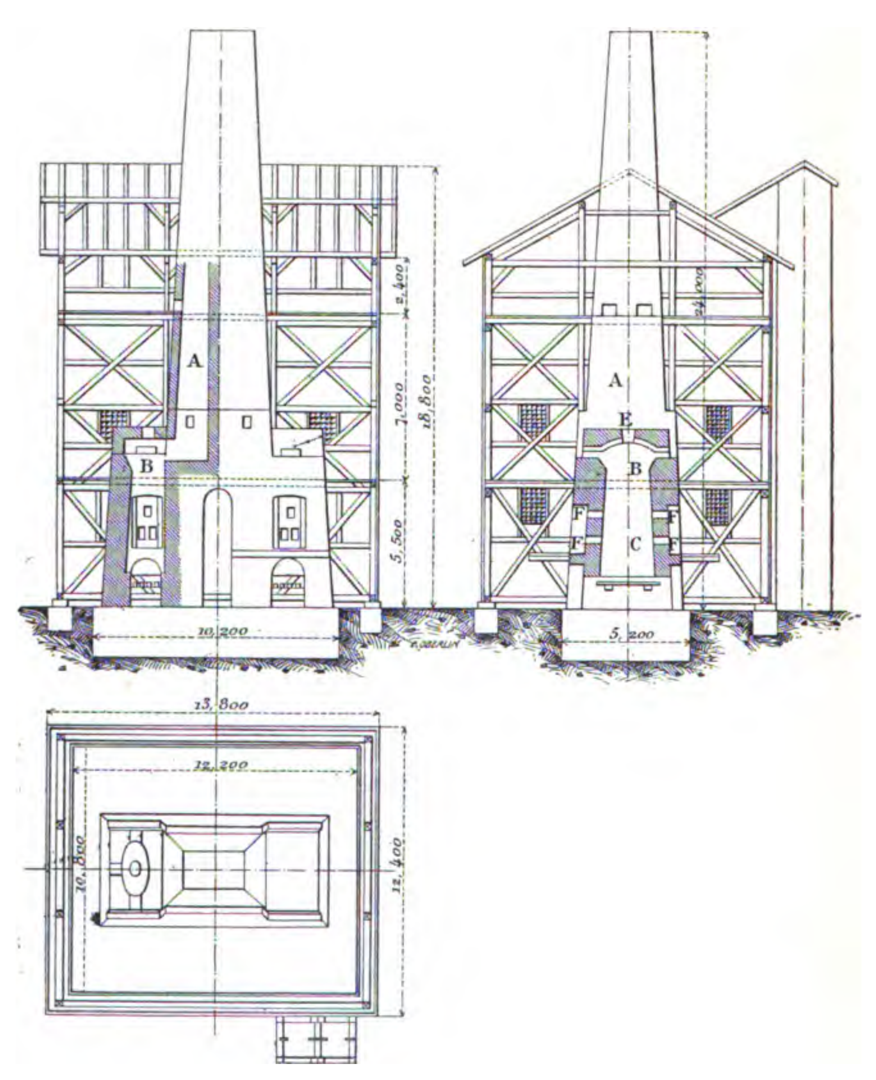

31. — Étagères-Séchoir, Four Hoffmann.

Ces divers inconvénients ont été évités en modifiant la forme des fours ; au lieu de les rétrécir par le bas, on leur donne une section de plus en plus grande jusqu'à la grille, ce qui favorise la descente des matières cuites. On a disposé des ouvertures par lesquelles on peut, à l'aide de ringards, détacher les matières qui adhèrent à la chemise ; la zone de cuisson se trouve à la partie supérieure du four et on arrive à obtenir la descente régulière du ciment cuit en faisant les charges et l'extraction à des périodes assez rapprochées.

Le four Dietzsch est vertical et sa hauteur totale est de 20 à 25 mètres ; mais, au niveau du plein feu, la partie supérieure est transportée parallèlement à elle-même à quelque distance de la partie inférieure et réunie à celle-ci par un conduit horizontal ; c'est cette disposition qui a fait donner à ce four le nom de four à étages (*fig.* 32).

Le four proprement dit a une forme elliptique ; la partie supérieure dans laquelle s'opère la cuisson s'appelle le creuset, au-dessous se trouve la chambre de refroidissement, sa hauteur est de 4 à 5 mètres. Un conduit horizontal voûté met le creuset en

communication avec le réchauffeur; celui-ci se compose d'une cheminée rectangulaire plus ou moins élevée selon le tirage



32. — Four Dietzsch.

A, réchauffeur; B, creuset; C, chambre de refroidissement; E, orifice permettant de ringarder dans le creuset; F, ouvertures par lesquelles on peut ringarder et surveiller la marche de la cuisson.

dont on a besoin; à 5 ou 6 mètres de hauteur un orifice disposé convenablement permet d'introduire la pâte sèche qui

remplit la cheminée et vient se répandre jusqu'au bord du creuset. Par des portes ménagées de chaque côté du creuset, on introduit le combustible qui doit être un charbon contenant une quantité assez grande de matières volatiles ; les gaz s'enflamment et viennent traverser la pâte contenue dans le réchauffeur ; celle-ci est ainsi portée à une température suffisante pour chasser tout l'acide carbonique. A heure fixe, on tire à la partie inférieure du four, qui est fermée par une grille à barreaux mobiles, une certaine quantité de ciment cuit ; tout le contenu du four descend et un vide se produit dans le creuset ; ce vide est comblé par de la pâte prise à l'aide d'une pelle dans le réchauffeur et en même temps on ajoute la quantité de combustible nécessaire pour obtenir la température de cuisson.

Les charges se font en moyenne toutes les demi-heures ; la période de cuisson est très courte ; le maximum de température se trouve à $1^m,50$ environ en dessous du niveau supérieur du creuset. Les matières cuites, à mesure qu'elles descendent, sont refroidies par l'air qui arrive à la partie inférieure et qui, en même temps, s'échauffe et arrive à une température élevée dans la zone de cuisson. Les pertes de chaleur sont encore moindres dans ce four que dans le four Hoffmann, et la récupération est plus complète.

Le pâte séjourne dans le réchauffeur de 12 à 24 heures, la cuisson dans le creuset dure 1 heure à 2 heures et le refroidissement 12 à 15 heures.

Il pourrait se produire parfois une vitrification trop considérable des roches et la masse ne descendrait plus ; pour remédier à cet inconvénient, des portes sont disposées de chaque côté du four et à deux niveaux, l'un correspondant à la zone de plein feu, l'autre un mètre plus bas. Les roches peuvent ainsi être attaquées de plusieurs côtés à l'aide de ringards et on les désagrège rapidement. Ces portes permettent aussi de reconnaître si la marche du four est bonne, si elle n'est pas trop lente ou trop active.

Quand on a commencé à utiliser le four Dietzsch on employait, pour le revêtement du creuset, des briques en ciment gâché avec une solution concentrée de chlorure de calcium : on

avait adopté ces briques parce que l'on pensait qu'avec les briques ordinaires en argile réfractaire on aurait des collages trop fréquents. On a reconnu depuis que la composition des briques n'avait qu'une importance secondaire et on a renoncé aux briques en ciment. Avec une chemise en briques réfractaires le four peut fonctionner deux ans sans interruption. Le rendement d'un four est de 6 à 10 tonnes par jour ; on a augmenté considérablement la production de ces fours en les soufflant avec des ventilateurs donnant une pression de 12 à 15 millimètres d'eau ; la combustion est beaucoup plus active et on peut alors retirer d'un four, par 24 heures, jusqu'à 15 tonnes de ciment cuit.

Les fours à étages sont toujours construits deux par deux comme l'indique la figure 30. Il en existe actuellement une quantité considérable dans les usines allemandes ; on en trouve aussi beaucoup en Russie.

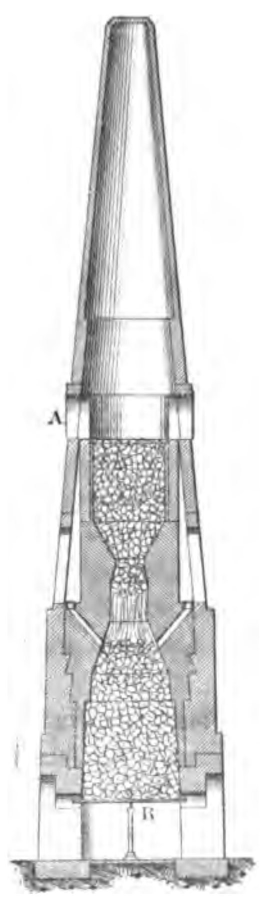
Le four Dietzsch est peut-être le plus économique au point de vue du combustible employé pour la cuisson ; on arrive avec des charbons de bonne qualité à employer seulement 150 à 180 kilogrammes de charbon pour cuire une tonne de ciment. Par contre, la conduite de ce four est assez délicate, elle est parfois très pénible ; enfin il faut que les matières à cuire soient des briques dures et solides, de manière à ne pas se réduire en morceaux en descendant dans le réchauffeur. On est alors obligé de mouler les briques en pâte molle, et le séchage est assez onéreux. On a essayé d'utiliser les briques comprimées à sec mais sans succès ; elles se réduisent en partie en poussière dans le réchauffeur et le tirage se produit alors très difficilement.

Les matières que l'on charge dans le réchauffeur doivent être absolument sèches ; si elles contenaient encore de l'humidité, la chaleur assez intense à laquelle elles sont soumises immédiatement les ferait éclater et les réduirait en menus fragments nuisibles à la bonne marche du four.

Four Schoffer ou de Aalborg. — Dès que le four Dietzsch eut démontré que la cuisson du ciment en fours coulants était possible et donnait des résultats économiques, on chercha des

dispositions se rapprochant du four à étages mais n'ayant pas ses inconvénients. Le four Schoffer est un des systèmes qui paraît avoir réussi le mieux jusqu'à présent ; mais il n'est employé qu'en Danemarck et ses avantages ne sont pas encore aussi bien démontrés que ceux du four Dietzsch.

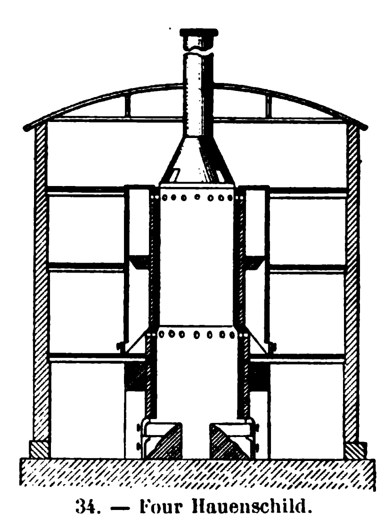
Dans le four Schoffer (*fig*. 33) le réchauffeur se trouve immédiatement au-dessus du creuset et dans son prolongement ; les matières descendent donc d'elles-mêmes dans le creuset. Le combustible est introduit par des ouvertures qui viennent déboucher à la base du creuset ; celui-ci a la forme d'un tronc de cône très évasé, de sorte que les gaz produits par la combustion du charbon se trouvent concentrés au sommet du cône où la température est très élevée. Au-dessous du creuset la chambre de refroidissement s'élargit encore et la surface de grille est très grande. Les matières à cuire sont introduites en *A* par une porte pratiquée dans la cheminée. D'après les inventeurs la consommation de charbon par tonne de ciment cuit serait de 130 kilogrammes et la production atteindrait 10 à 15 tonnes par jour.



33. — Four Schoffer.

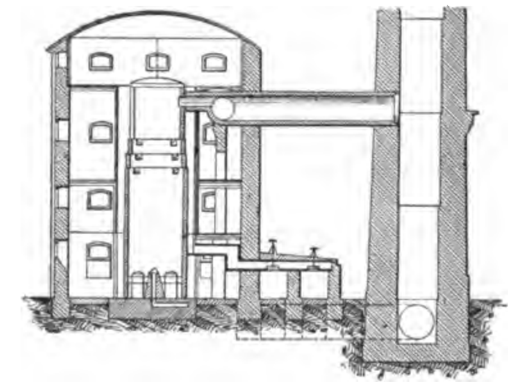
Four Hauenschild (*fig*. 34 et 35). — Dans ce système de four il n'y a plus de réchauffeur et de creuset ; c'est un four cylindrique ordinaire se chargeant par le haut ; son diamètre est assez grand ; il demande un tirage modéré. Ce four ne se distinguerait pas des fours intermittents si ses parois ne présentaient une disposition spéciale destinée à empêcher les collages. La paroi du four est aussi mince que possible, elle est constituée par de la tôle ou par une enveloppe en ciment avec ossature métallique protégée simplement par une chemise en briques réfactaires. A

quelque distance de cette enveloppe il en existe une autre et l'espace compris entre ces deux enveloppes est utilisé de diverses manières ; d'abord l'inventeur l'employait pour le séchage des matières premières : puis il s'est contenté d'y faire circuler de l'air destiné à refroidir la chemise du four; les briques réfractaires étant ainsi refroidies constamment, ne peuvent pas prendre une température aussi élevée que le ciment en fusion et on évite ainsi les collages. Le four Hauenschild n'a pas non plus la sanction d'une longue pratique et on ne peut encore se prononcer sur sa valeur.



34. — Four Hauenschild.

Bien d'autres brevets ont été pris pour des fours se rapprochant plus ou moins du four à étages; mais, en dehors des trois types décrits ci-dessus, nous n'en connaissons pas ayant donné des résultats vraiment pratiques.

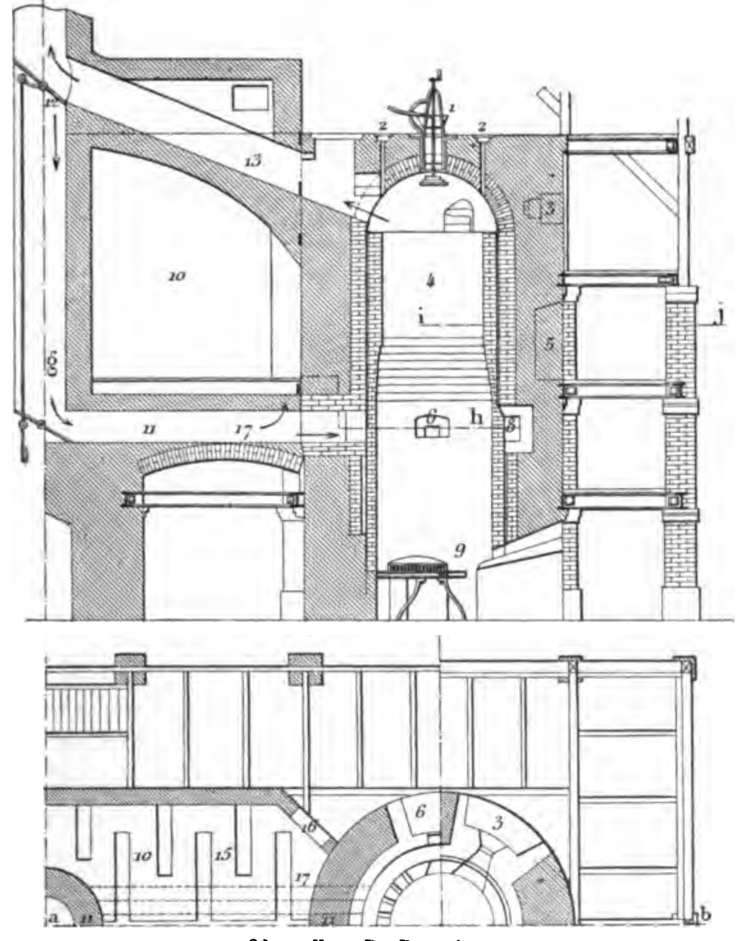


35. — Four Hauenschild. Disposition en groupe.

Fours continus à séchoirs. — Les fours coulants dont nous venons de parler sont employés uniquement pour la cuisson; le séchage des matières doit s'effectuer dans des séchoirs spéciaux. On a cherché à combiner les deux opérations et à réaliser dans les fours continus ce que l'on avait obtenu avec les fours Johnson. Le premier four qui ait été bien étudié dans ce sens est celui de M. Du Pasquier. Ce four ne diffère pas du four Dietzsch en ce qui concerne la partie inférieure; mais le réchauffeur est remplacé par des

chambres placées entre le four et la cheminée et que les gaz de la combustion doivent parcourir. Ces chambres sont remplies de briques à sécher; pour pouvoir les enlever et en apporter de nouvelles on isole les chambres à l'aide de registres et pendant ce temps les gaz vont directement à la cheminée (*fig.* 36).

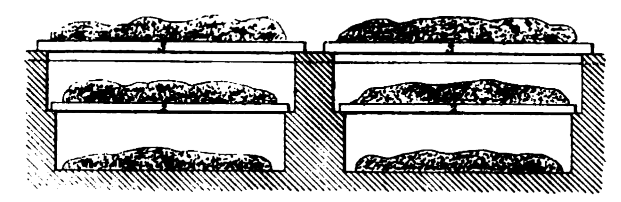
D'autres fours à peu près semblables ont été construits à l'usine



36. — Four Du Pasquier.

de Ruddersdorf. En appliquant aux fours continus les séchoirs que nous avons décrits (*fig.* 26) MM. Lavocat et Candlot sont parvenus à obtenir le séchage complet de pâtes molles contenant

jusqu'à 45 % d'eau. Les séchoirs étant placés l'un à côté de l'autre, les gaz peuvent passer tantôt dans l'un, tantôt dans l'autre et ils se trouvent ainsi entièremeut utilisés. Quand on envoie aux séchoirs de la pâte très liquide à 40-45 % d'eau, la disposition avec étagères (*fig.* 26) est toujours préférable; si on peut déssécher en partie la pâte à l'air et l'amener à 30-35 % d'eau, on peut alors établir les séchoirs comme l'indique la figure 37. Les conduits des gaz, toujours disposés deux par deux, sont recouverts par des plaques minces en ciment armé (3). Ces plaques, dans le sens transversal, sont soutenues par des fers à ⊓ ; à mi-hauteur se trouvent d'autres plaques plus petites (2); la pâte à sé-



37. — Séchoirs alternatifs.

cher peut être disposée dans le fond des canaux, sur les plaques du milieu et sur celles du dessus ; on a ainsi trois couches de pâte. Pour vider les séchoirs on relève les plaques en ciment en les faisant tourner autour d'un des grands côtés.

Les fours-séchoirs continus présentent des avantages incontestables sur tous les autres systèmes, quand on emploie la voie humide pour la préparation de la pâte. La production de ces fours est le double de celle des fours intermittents et l'économie réalisée sur la construction est déjà considérable ; il faut y ajouter celle qui résulte d'un entretien beaucoup moins coûteux et d'une dépense moindre de combustible.

Depuis quelques années on a fait breveter beaucoup de fours-continus avec ou sans séchoirs ; les dispositions en sont généralement assez compliquées et dans beaucoup d'entre eux on constate que l'imagination des inventeurs s'est donnée libre cours sans aucun souci de connaissances scientifiques et pratiques. Le four-coulant parfait n'est certainement pas encore

trouvé mais on peut affirmer que l'on ne réalisera de progrès qu'en simplifiant de plus en plus les fours et en s'efforçant de rendre leur marche indépendante, autant de possible, de l'attention et de la bonne volonté des cuiseurs (1).

Four rotatif. — L'emploi de ce système de four a été tenté en Angleterre par M. Ransome ; mais les essais n'ont pas réussi ; aux Etats-Unis, où le four rotatif faisait son apparition à peu près à la même époque, les résultats furent plus satisfaisants et actuellement il existe un certain nombre de ces appareils dans plusieurs usines. Le four rotatif se compose essentiellement d'un cylindre de 10 mètres de longueur et de 1m,50 de diamètre intérieur (*fig.* 38), il est légèrement incliné. Le cylindre est en tôle et il est garni à l'intérieur de briques réfractaires ; le mouvement de rotation est produit par un engrenage et le cylindre tourne sur des galets ; il fait une révolution par minute.

La matière à cuire est introduite dans le four à l'état de poudre sèche ; elle est entraînée par une vis sans fin qui la déverse régulièrement dans le four. Par suite de l'inclinaison et du mouvement de rotation du four, la poudre est entraînée peu à peu vers l'extrémité inférieure du cylindre où se trouve la zone de cuisson. On obtient une température suffisante pour vitrifier le ciment à l'aide d'un jet de pétrole lancé par un ajutage spécial. Le ciment vitrifié s'agglomère en petites masses rondes

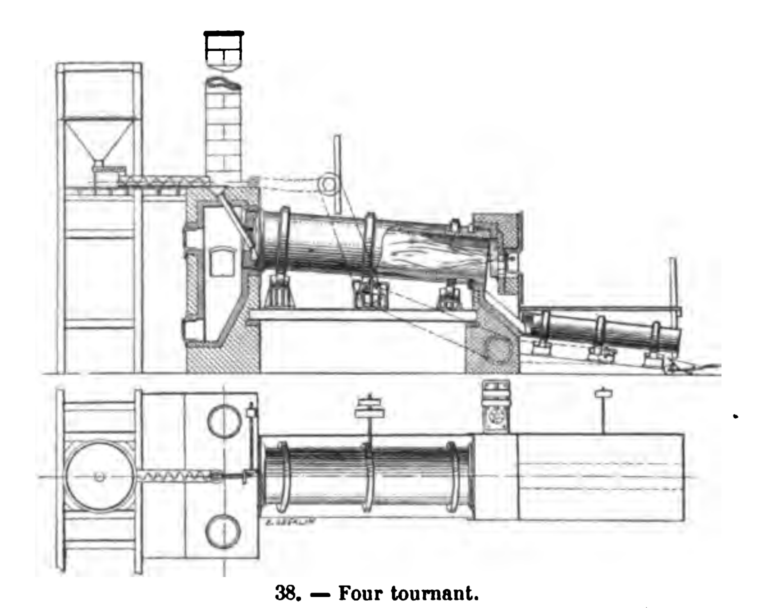
(1) A ce point de vue, le four Stein, dont l'apparition est relativement récente, paraît devoir donner des résultats intéressants. Ce four est constitué simplement par un cylindre en fonte de 9 à 10 mètres de hauteur et de 2m,40 de diamètre. Ce cylindre est construit à l'aide d'anneaux de 0m,50 de hauteur placés les uns au-dessus des autres ; ils sont munis d'ailettes entourées par une enveloppe extérieure ; entre ces deux enveloppes on fait circuler un fort courant d'air et on obtient ainsi le refroidissement de la paroi du four. De cette manière, on peut avoir dans le four une température de 1 600° sans craindre de fondre la chemise en fonte. Il en résulte que les collages sont complètement évités, et on n'a plus à se préoccuper de cet inconvénient, le plus grand de tous ceux qui se présentent dans la cuisson en fours coulants. De plus, la zône de cuisson peut être maintenue assez bas et on obtient une utilisation parfaite du combustible. Avec l'emploi d'une soufflerie, ce four produirait 15 à 20 tonnes de ciment par vingt-quatre heures avec une dépense de 120 à 130 kilogrammes de combustible.

Quelques inventeurs ont aussi préconisé les chemises en tôle avec circulation d'eau comme cela existe dans les fours métallurgiques appelés « Watter Jacket ».

qui s'écoulent facilement ; si elles collent contre les parois du four, on peut les détacher à l'aide de ringards.

A la sortie du four, les matières cuites tombent dans un autre cylindre plus petit dans lequel elles se refroidissent.

La cuisson se produit en une demi-heure environ avec cet



38. — Four tournant.

appareil qui peut produire jusqu'à 30 tonnes par jour. Si la cuisson est régulière, ce système de four serait très avantageux en raison de sa grande production et de la suppression presque totale de la main-d'œuvre.

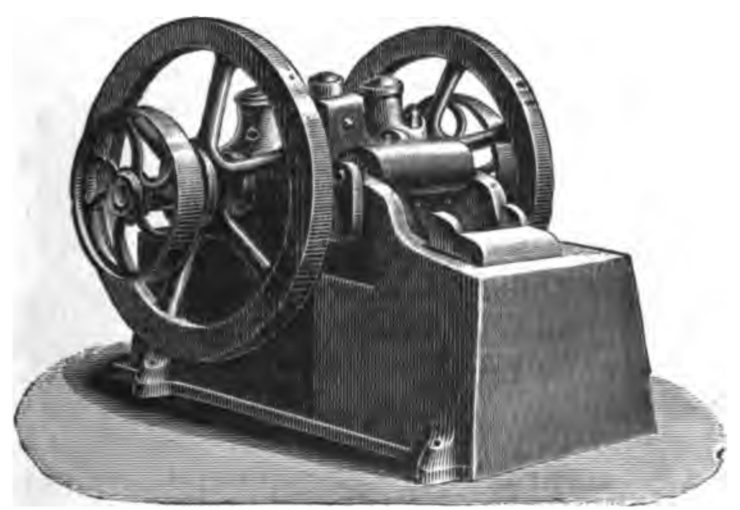
Triage. — A la sortie des fours, les roches bien cuites sont facilement reconnaissables ; elles sont noires ou noir-verdâtres et leur densité est très élevée ; les parties qui n'ont pas subi une vitrification complète ont une teinte grise ou gris-verdâtre ; les incuits ont une couleur jaune-clair ou jaune-brun et leur densité apparente est très faible ; le triage est donc facile à exécuter. Les gros blocs sont désagrégés et cassés pour s'assurer que la cuisson est bien complète au centre aussi bien qu'à la surface.

On trouve également dans les fours une certaine quantité de poussière de couleur grise qui est constituée en grande partie par du ciment qui a subi un excès de cuisson et qui s'est réduit spontanément en poudre au refroidissement. On donne à cette poussière le nom de poussière lourde, pour la distinguer de la poussière légère qui provient de l'extinction des incuits et qui est d'ailleurs facile à reconnaître à sa couleur jaunâtre. Les incuits sont mis à part et ils subissent une nouvelle cuisson ; la poussière lourde est mélangée en petite quantité avec les roches bien cuites ; la poussière jaune est rejetée.

Mouture. — La mouture constitue une opération très dispendieuse dans la fabrication du ciment, étant donnée la grande dureté des roches vitrifiées ; aussi les appareils de mouture sont-ils assez nombreux.

En général, le ciment est d'abord réduit en petits fragments à l'aide de concasseurs à mâchoires et de cylindres lamineurs ; puis il est passé dans des meules analogues à celles employées pour la mouture du blé.

La figure 39 représente un concasseur à mâchoires ou con-



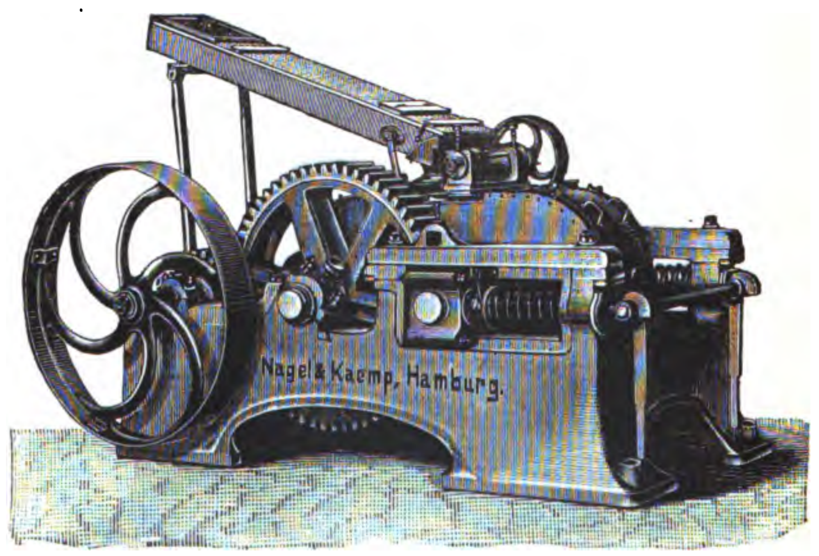
39 — Concasseur Blacke.

casseur Blacke, du nom de son inventeur. Les matières intro-

duites dans le concasseur sont broyées contre la mâchoire fixe par la mâchoire mobile qui est animée d'un mouvement oscillatoire rapide; un arbre coudé actionne une bielle qui, par un levier articulé, fait mouvoir la mâchoire mobile; cet arbre est muni de deux volants et de deux poulies. Quelquefois on se contente d'un volant et d'une poulie. Les mâchoires sont composées de plaques cannelées ou non, en fonte durcie coulée en coquille.

L'écartement supérieur des mâchoires mesure 420 × 265 millimètres; l'écartement inférieur peut être réglé à volonté selon le degré de finesse que l'on désire obtenir; on se contente généralement de 40 à 50 millimètres. Avec cet appareil on peut concasser environ 5 000 kilogrammes de ciment à l'heure.

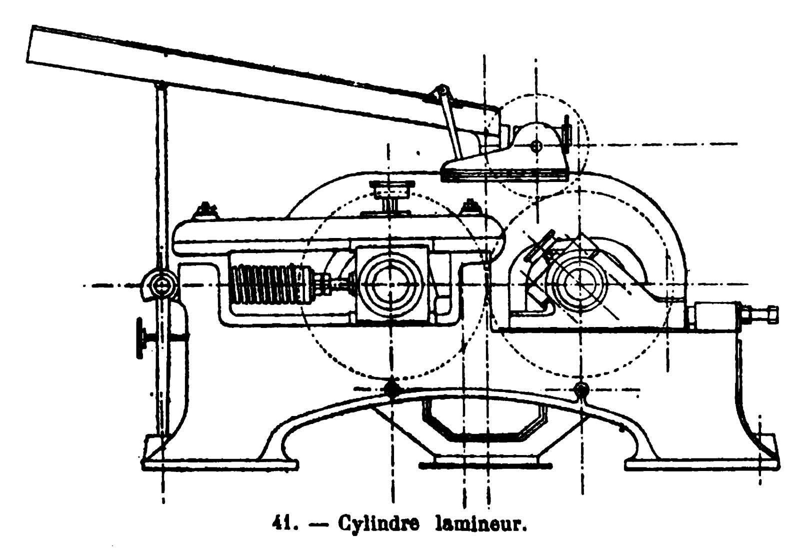
Les cylindres lamineurs destinés à réduire en grains les morceaux de ciment sortant du concasseur, sont construits de différentes manières, mais les dispositions essentielles sont toujours peu près les mêmes. Les figures 40-41 représentent le moulin à



40. — Cylindre lamineur.

cylindres construit par la maison Nagel et Kaemp, de Hambourg. Comme on le voit, les cylindres ont un grand diamètre; ils sont en fonte durcie coulée en coquille ou en acier fondu au creuset.

L'un des cylindres est fixe tandis que les coussinets sur lesquels reposent les axes de l'autre cylindre peuvent se mouvoir



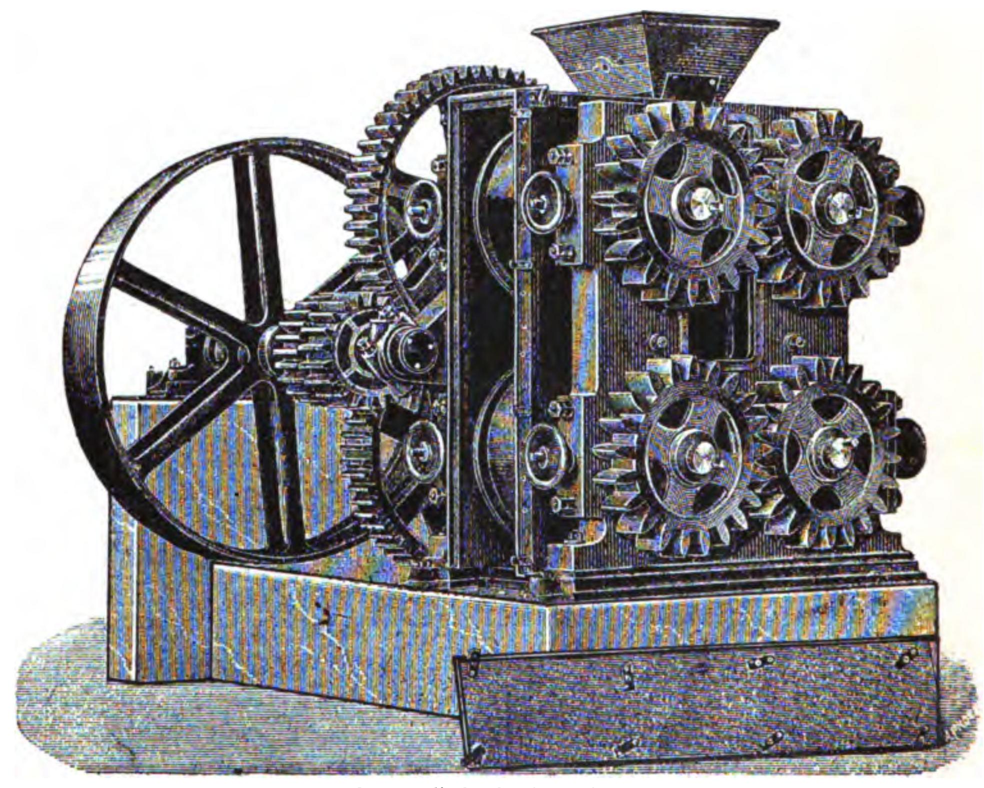
41. — Cylindre lamineur.

dans des glissières et s'appuient contre de forts ressorts en spirales. Cette disposition permet à l'un des cylindres de s'écarter si une matière très dure, comme un morceau de fer, par exemple, vient à passer accidentellement. La commande se fait par courroie avec l'intermédiaire d'un engrenage ; on construit également des moulins à cylindres dans lesquels l'engrenage intermédiaire n'existe pas.

Les laminoirs sont quelquefois composés de deux ou trois paires de cylindres superposés ; l'écartement est alors de plus en plus faible (*fig.* 42) ; avec cette disposition on n'a pas besoin de séparateur pour faire retourner aux cylindres les morceaux encore trop gros, comme cela est nécessaire avec les laminoirs simples.

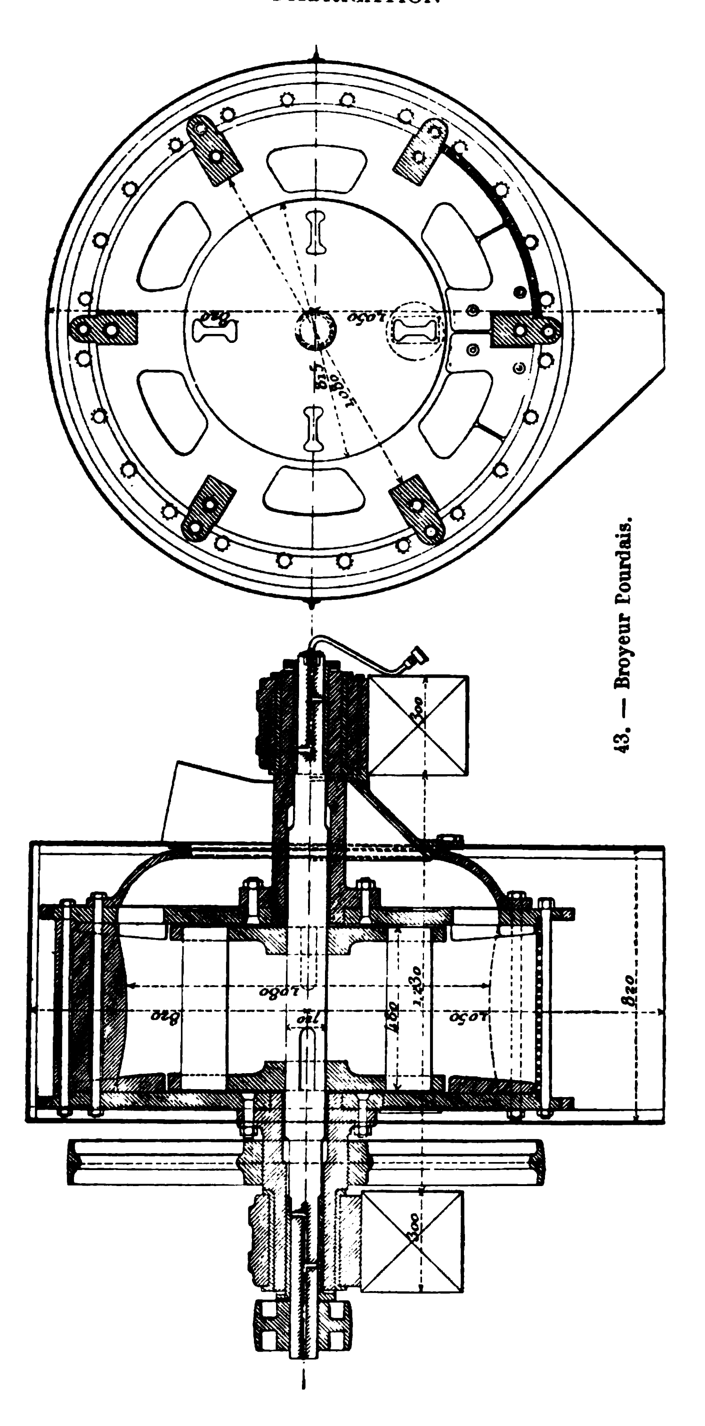
La réduction du ciment en grains peut être obtenue avec un seul appareil dont le meilleur type est le broyeur Bourdais (*fig.* 43) ; employé surtout pour le traitement des phosphates, ce broyeur a été modifié spécialement pour la fabrication du ciment et il peut remplacer avec avantage les concasseurs et les cylindres. Il se compose de deux tambours tournant l'un dans l'autre ; le plus grand est garni de tôles perforées maintenues par

des pièces appelées contre-marteaux ; ce tambour tourne à 30 tours par minute : le tambour intérieur est formé par deux



42. — Cylindre lamineur Luther.

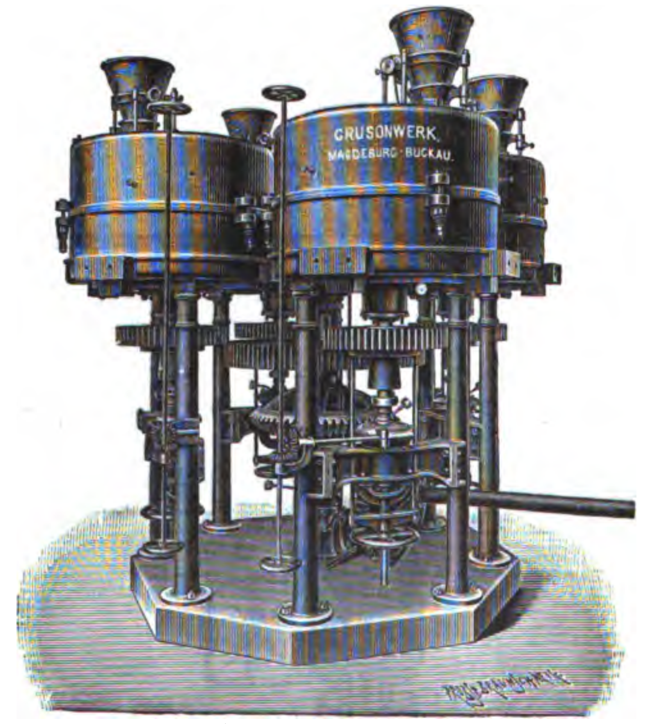
plateaux d'un diamètre plus petit portant quatre bouts de rails ou marteaux, ce tambour tourne à 1 000 tours par minute. Les matières introduites par une trémie pénètrent dans l'appareil par des ouvertures ménagées sur les côtés entre le petit et le grand tambour ; elles tombent sur les rails et sont broyées aussitôt ; elles sont projetées contre la tôle perforée du grand tambour et les parties assez fines passent au travers ; les morceaux encore trop gros remontent et retombent sur les marteaux. Les trous de la tôle perforée ont 10 à 12 millimètres de diamètre ; les rails peuvent se changer très facilement ; ils sont simplement maintenus dans des évidements pratiqués dans les plateaux. Les parois latérales sont garnies de plaques qui



43. — Broyeur Pourdais.

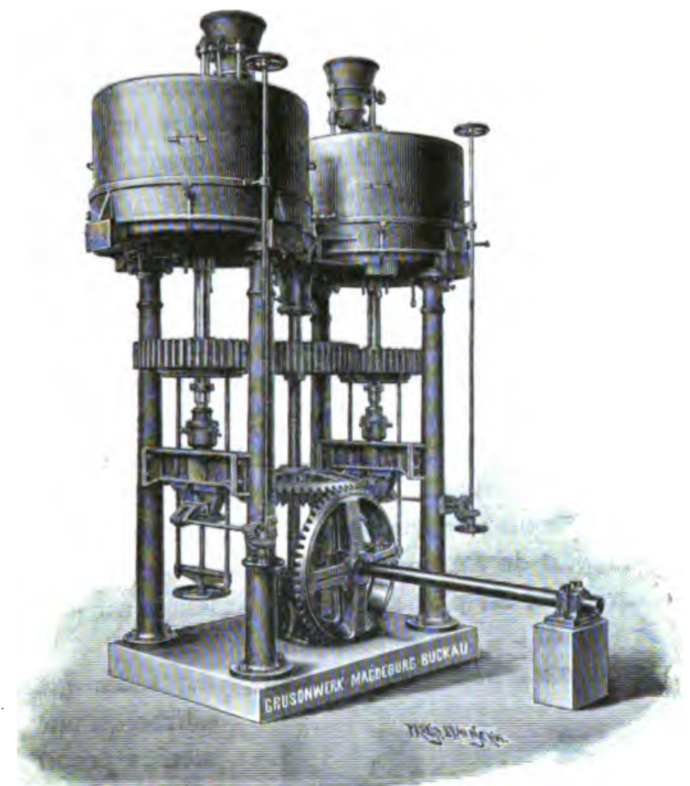
peuvent être changées ; elles s'usent d'ailleurs très peu ; les rails seuls doivent être remplacés de temps en temps ; mais on peut les retourner et on les use ainsi jusqu'au bout. L'espace compris entre le petit et le grand tambour est de 0,20 ; par suite, il ne peut pas se produire d'engorgement et l'introduction d'une matière étrangère très dure (pièce de fer ou de fonte) n'a pas d'inconvénient, tandis qu'avec les cylindres laminoirs ces matières déterminent des accidents souvent très graves. La production d'un broyeur Bourdais peut atteindre facilement 6 à 8 000 kilogrammes à l'heure. La force absorbée est de 5 à 6 chevaux.

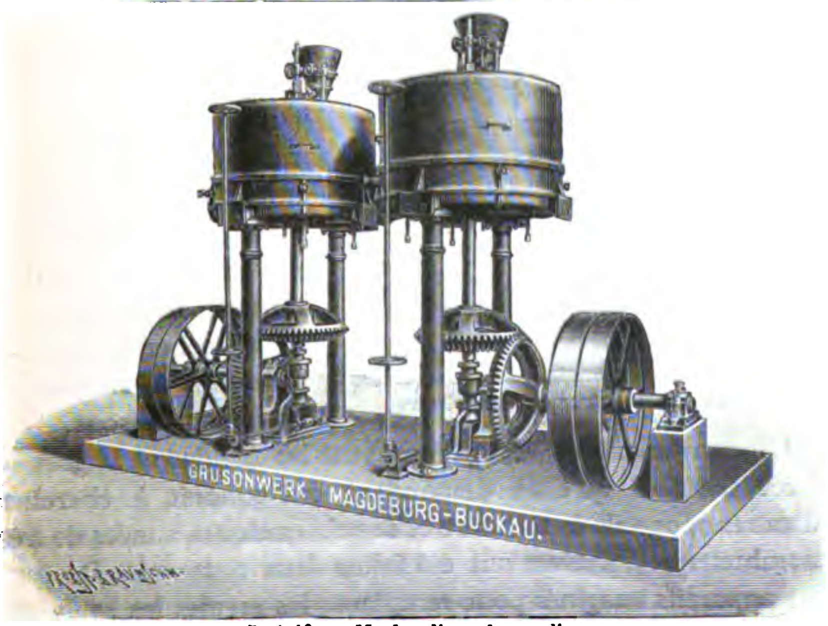
Les meules employées pour la mouture du ciment sont semblables à celles qui sont utilisées pour le blé. La meule inférieure, appelée gisante, est fixe ; la meule supérieure, ou courante, tourne à raison de 100 à 130 tours par minute. Le dia-



44. — Groupe de meules en beffroi.

mètre des meules varie de 1m,20 à 1m,50 ; le diamètre de 1m,30





45 et 46. — Meules disposées en ligne.

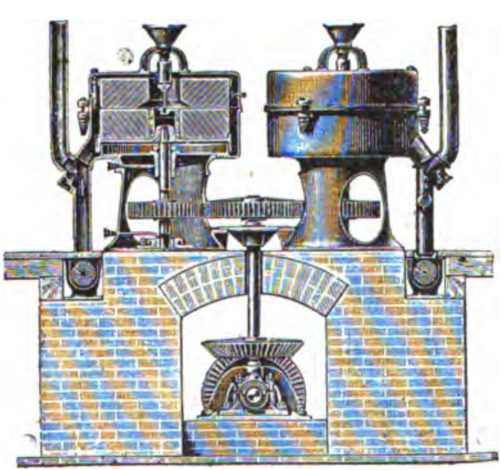
est le plus employé, la vitesse est alors de 120 tours. Le ciment granulé est introduit au centre d'une manière régulière ; avec les appareils appelés distributeurs on peut régler l'arrivée du ciment et obtenir un meilleur travail de la meule.

Les meules sont en pierres siliceuses dont les plus renommées se trouvent à la Ferté-sous-Jouarre ; on trace dans la pierre des rayons destinés à faciliter l'entraînement des matières ; de temps en temps on doit enlever les meules et les retailler car elles se polissent et elles ont alors un rendement beaucoup plus faible.

Les meules sont disposées en ligne, ou en deux lignes parallèles, ou enfin en beffroi par groupes de quatre ou même de six. Les figures 44, 45, 46 reproduisent ces trois dispositions.

Les moulins à meule tournante inférieure sont aussi employés quelquefois ; on trouve à cette disposition certains avantages ; le mode de fixation de la meule à l'arbre qui lui donne son mouvement est plus simple, le graissage est plus facile et plus sûr (*fig.* 47).

La force absorbée par les meules est assez grande ; on estime qu'une paire de meules prend 30 à 35 chevaux. La production est de 1 000 à 1 100 kilogrammes à l'heure pour une mouture variant de 25 à 30 % sur le tamis de 4 900 mailles; mais quand les meules ne sontpas bien entretenues, le rendement peut tomber à 600 kilogrammes à l'heure et même au-dessous.



47. — Meule à tournante inférieure.

L'inconvénient de retailler souvent les meules et la grande force motrice qu'elles demandent ont conduit à chercher d'autres appareils de mouture et depuis quelques années de très nombreuses tentatives ont été faites dans cette voie. De tous les appareils imaginés pour remplacer les meules les seuls qui

aient été employés sur une assez grande échelle sont les broyeurs à boulets et le broyeur Griffin.

Le broyeur à boulet de Morel a été décrit de la manière suivante par M. Gobin (1).

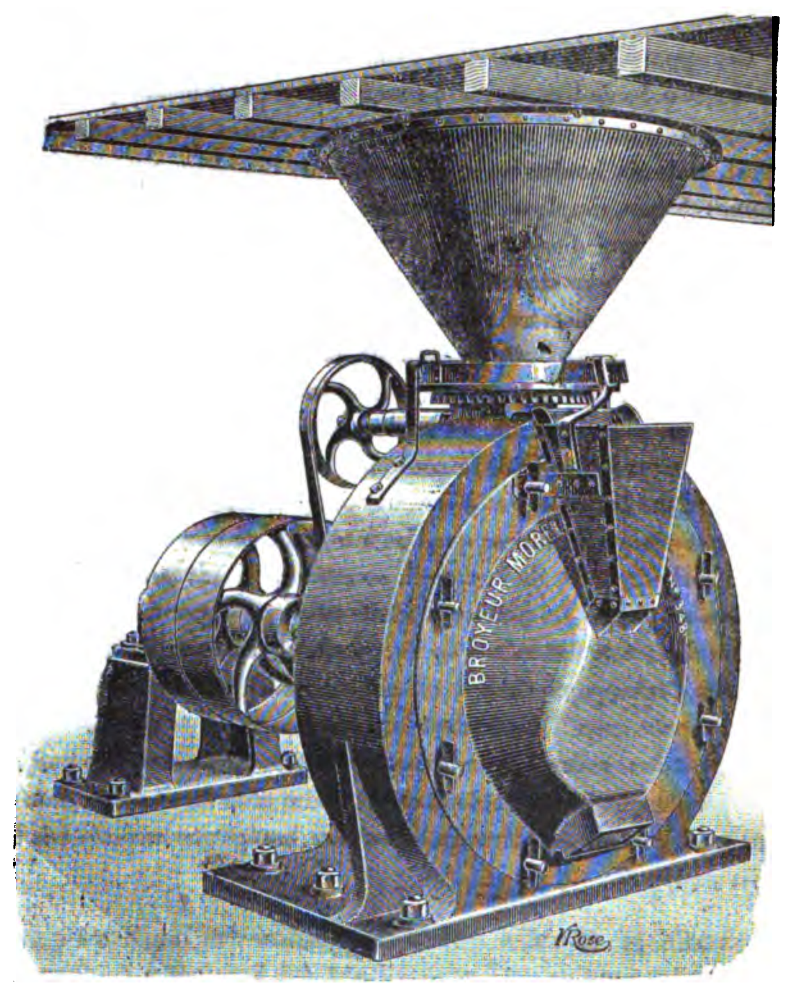
« Cet appareil a la forme d'un cylindre à axe vertical de 1 mètre de diamètre et 0,50 de hauteur; il se compose de six bras métalliques partant d'un moyeu central ou menard, mis en mouvement par un arbre à axe vertical, et de six boulets en acier de 0,20 de diamètre, pesant 35 kilogrammes chacun, simplement intercalés entre les bras, sans aucune liaison. Le tout est entouré d'une couronne cylindrique en acier présentant intérieurement une gorge circulaire à section sphérique décrite avec un rayon égal à celui des boulets avec une flèche de 3 centimètres ; cette couronne est surmontée d'une toile métallique destinée à tamiser la poudre. Lorsque le moyeu est mis en mouvement avec une vitesse de rotation de 180 à 200 tours par minute, les boulets, chassés par la force centrifuge, s'engagent dans la gorge de la couronne et poussés par les bras roulent en restant dans cette gorge et y écrasent par pression, roulement et glissement, la matière à pulvériser que l'on introduit, au moyen d'une trémie, dans la partie centrale de l'appareil, comme on le fait pour les moulins à meules en pierre La poudre produite est chassée par le courant d'air résultant de la rotation même de l'appareil, et traversant la toile métallique, elle s'échappe au dehors, où elle est recueillie dans l'espace annulaire compris entre l'appareil et une cloche en fonte qui l'enveloppe entièrement de manière à éviter toute déperdition de poudre. Des raclettes mues par l'appareil rassemblent cette poudre et la font tomber dans un conduit qui l'amène aux blutoirs, où elle se tamise une seconde fois à la finesse voulue. »

Plus tard M. Morel a réduit le nombre des boulets à quatre et toutes les parties de l'appareil ont été beaucoup renforcées ; enfin dans le dernier type les boulets tournent dans un plan vertical (*fig.* 48 et 49). La vitesse de rotation est de 220 à 240 tours par minute.

Le broyeur Morel n'est pas encore beaucoup utilisé dans les

(1) Etude sur la fabrication et les propriétés des ciments de l'Isère, par M. A. Gobin, Ingénieur en chef des Ponts et chaussées (*Annales des Ponts et chaussées.* Juin 1889).

fabriques de ciment Portland ; on l'emploie plutôt dans les fabriques de ciment prompt et pour la mouture des grappiers ou des laitiers. On a imité et modifié de plusieurs manières le

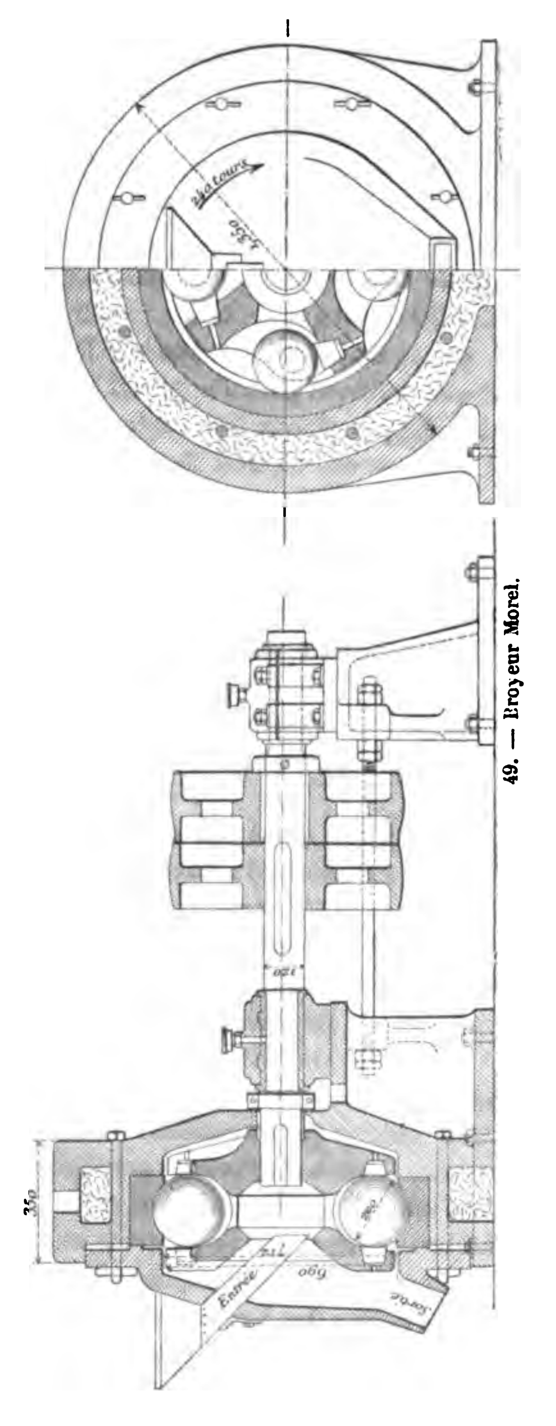


48. — Broyeur Morel. Type vertical.

broyeur Morel ; dans le broyeur Pfeiffer la poudre est enlevée au fur et à mesure de sa production par un aspirateur ; le broyeur « Phénix », système Bailly et Gesnel, de Nancy, paraît réaliser des dispositions avantageuses ; les boulets sont entraînés sur un plan horizontal par un disque propulseur en

forme de tronc de cône et tournant à 110 tours par minute; une soufflerie envoie de l'air qui, passant sur tout le contour de l'auge dans laquelle tournent les boulets, entraîne la poudre fine hors de l'appareil. La production n'est que de 800 à 1 000 kilogrammes à l'heure, mais la force dépensée est seulement de 15 et 18 chevaux et l'usure ne paraît pas devoir être très grande.

Le broyeur à boulets du système Jenisch ou Lohnert est tout différent du broyeur Morel. Il se compose d'un grand tambour dont l'enveloppe est formée de plaques à courbure circulaire percées de trous de 6 à 8 millimètres ; ces plaques sont en acier ou en fonte durcie. Les boulets sont libres et ils roulent les uns sur les autres ; ils ont des diamètres variant de 20 à 120 millimètres ; le poids des boulets contenus dans un moulin



49. — Broyeur Morel.

du plus grand modèle est de 900 kilogrammes. Par suite de la disposition des plaques, les boulets subissent à chaque instant des chutes qui favorisent leur action.

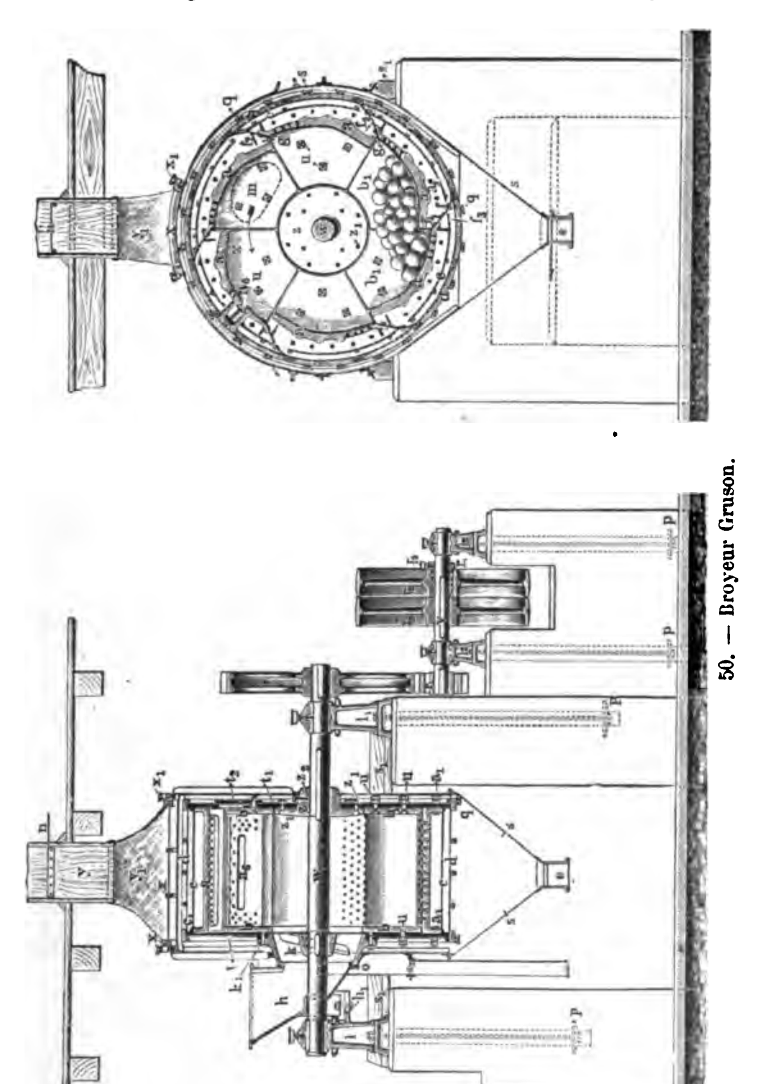
La matière broyée passe d'abord à travers des trous pratiqués dans les plaques triturantes; au-dessous se trouvent des tôles perforées qui ne laissent passer que les matières assez fines, enfin le tambour est garni extérieurement de toile métallique du n° 70 ou 80 qui ne laisse passer que la fine poussière. Tous les grains trop gros retenus par la tôle perforée et la toile métallique rentrent dans l'appareil par les ouvertures qui existent entre chaque plaque triturante (*fig.* 50).

La vitesse de rotation de ces broyeurs est seulement de 25 à 30 tours par minute ; la production est de 700 à 900 kilogrammes à l'heure avec une mouture de 25 °/₀ sur le tamis de 4 900 mailles. La force absorbée est de 18 à 20 chevaux. Ces appareils présentent certains avantages dont le principal est qu'ils constituent un broyeur complet dans lequel on peut introduire les matières en gros morceaux sans avoir besoin de passer par un concasseur. Il en résule une grande simplicité dans l'installation et une réduction importante de la main-d'œuvre.

Les critiques n'ont pas manqué contre les appareils à boulets et la question de savoir s'ils doivent être préférés aux meules n'est pas encore résolue. Les plus grandes usines d'Allemagne ont encore monté récemment des moulins avec meules. Il est certain que le rendement des broyeurs à boulets est encore un peu faible, surtout si l'on veut obtenir une mouture très fine; suivant la qualité des matériaux employés pour la construction, l'usure peut être très réduite ou considérable; le succès obtenu par la maison Gruson de Magdebourg avec ces broyeurs tient à la qualité exceptionnelle des matières qu'elle utilise pour les plaques triturantes.

L'alimentation des broyeurs a une influence importante sur le rendement; on conçoit, en effet, que si le broyeur est trop chargé, l'action des boulets est moins efficace ; il en est de même si l'on introduit la matière à broyer trop lentement. La maison Gruson construit des appareils chargeurs qui permettent une

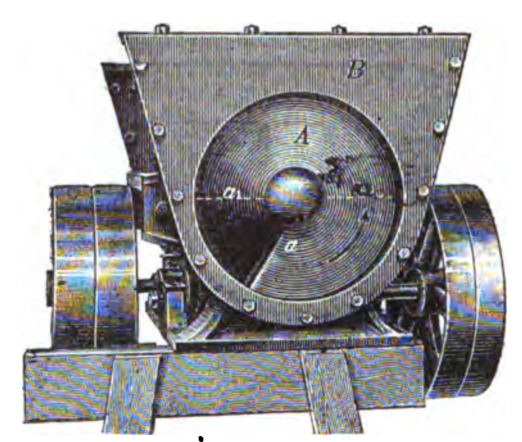
alimentation automatique des broyeurs. Ces appareils se composent d'une auge en fonte fermée à une extrémité par un dis-



50. — Broyeur Gruson.

que circulaire, en fonte également, qui tourne plus ou moins vite (*fig*. 51-52). Ce disque a une surface frontale héliçoïdale et agit à la manière d'une vis transporteuse ordinaire; à chaque révolution, une certaine quantité de matière s'échappe de l'auge et tombe dans le broyeur par la tubulure qui se trouve devant le

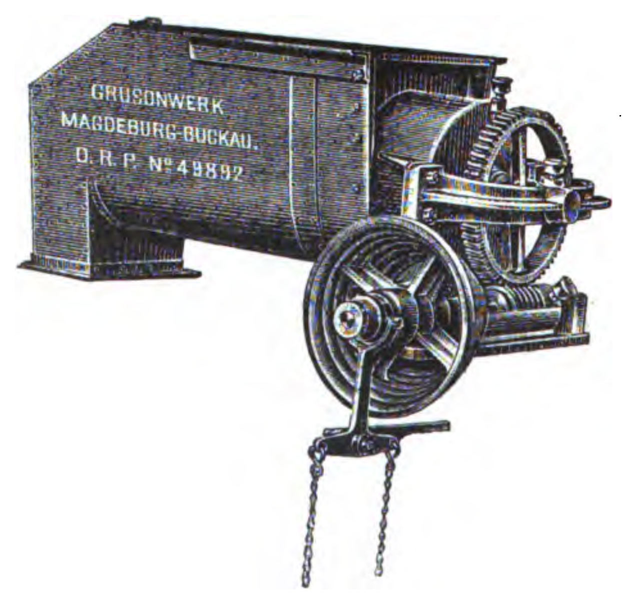
disque. Au-dessus du chargeur se trouve une grande trémie en bois contenant la matière à broyer et dont l'appareil chargeur constitue pour ainsi dire le fond.



51. — Appareil chargeur. Vue du côté de la sortie du ciment.

Les broyeurs à boulets sont parfois utilisés seulement comme concasseurs; on supprime alors les tamis, et les matières qui sortent de l'appareil sont composées en grande partie de grains de 6 à 8 millimètres.

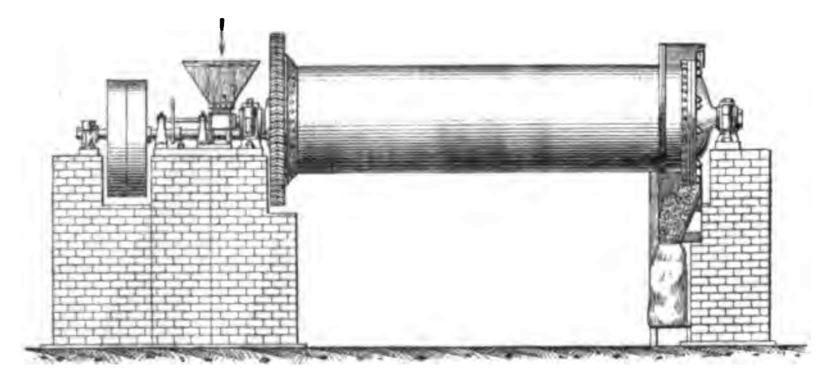
La mouture est achevée avec des meules ou d'autres appareils.



52. — Appareil chargeur avec poulie permettant de régler la vitesse de rotation de la vis.

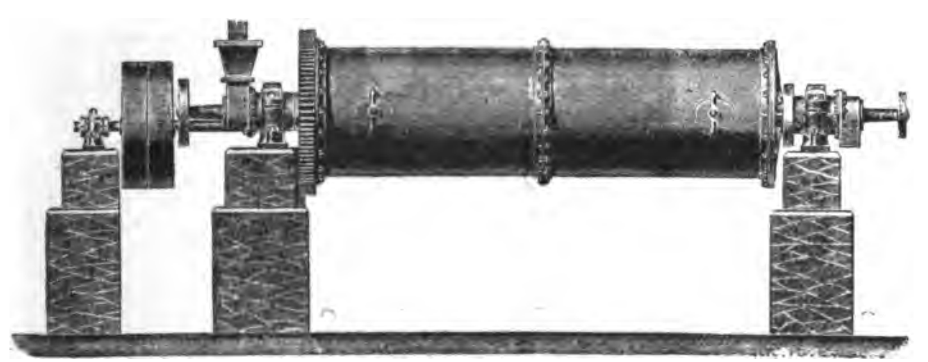
Le tube-broyeur est destiné à réduire en poudre très fine les matières préparées par les broyeurs ordinaires. C'est un tambour de 3 à 5 mètres de longueur et $1^m,0$ à $1^m,50$ de diamètre

garni intérieurement de plaques en grès ou en acier; il contient une grande quantité de boulets en fonte ou en silex de petit diamètre. Les matières sont introduites à une extrémité de l'appareil, elles sont entraînées par le mouvement de rotation et elles sortent à l'autre extrémité par une grille qui retient les boulets. Le nombre de révolutions est de 30 par minutes. La production de ce broyeur serait de 2 à 3000 kilogrammes à l'heure; la force absorbée est de 30 chevaux. Il existe plusieurs dispositions de tubes-broyeurs ou broyeurs-finisseurs qui



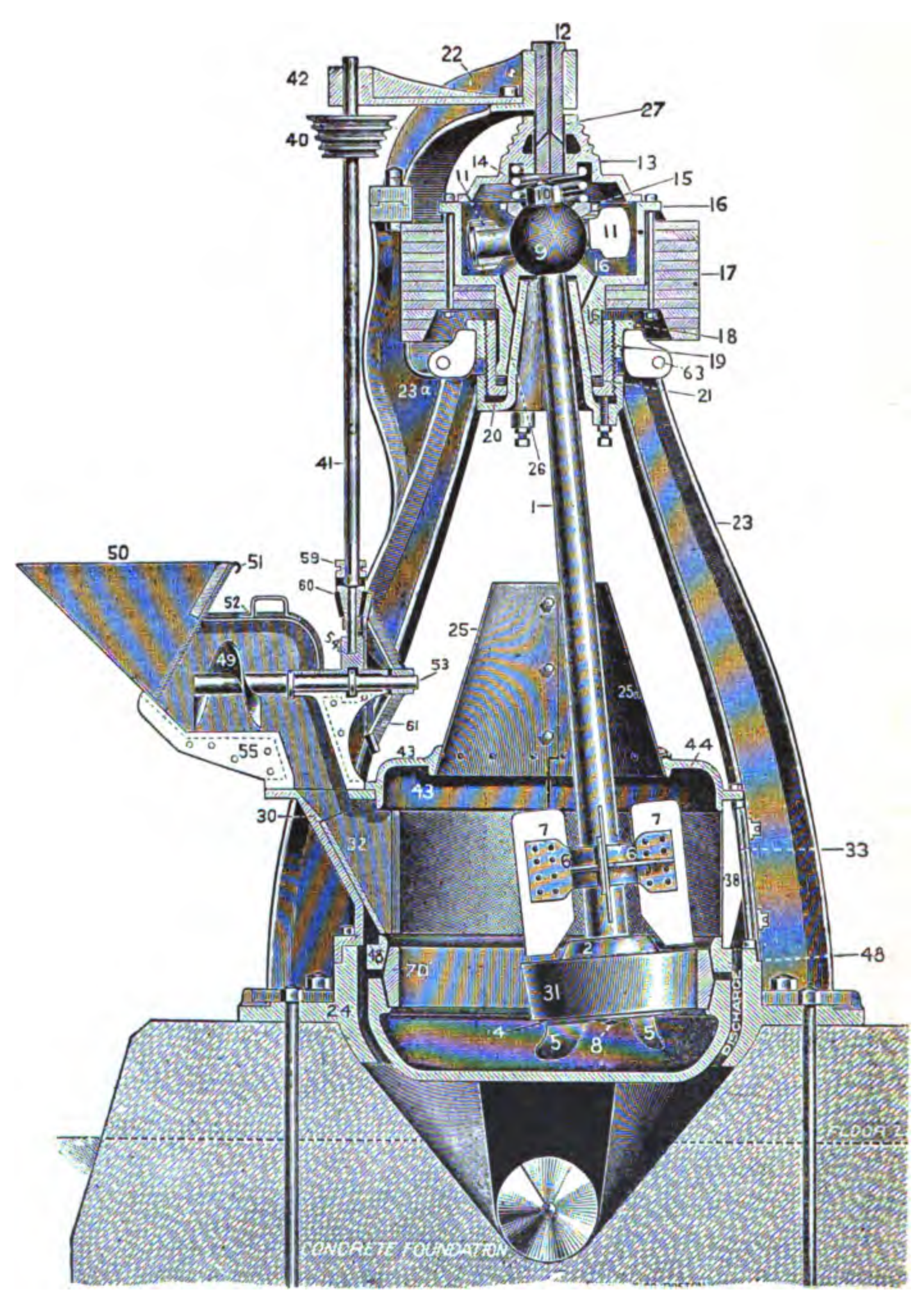
53. — Tube-Broyeur ou broyeur-finisseur.

dérivent du broyeur Alsing ; ces appareils sont contruits par les maisons Schmidt, *(fig.* 53*)* Luther, (*fig*, 54) Gruson, etc.



54. — Broyeur-finisseur Luther.

Le moulin Griffin est employé aux Etats-Unis depuis plusieurs années et les résultats paraissent être satisfaisants. La figure 55 fait voir les dispositions de ce broyeur qui se compose essentiellement d'une meule tournant contre un anneau ; cette meule



55. — **Broyeur Griffin.**

24, bac percé de trous d'évacuation, avec anneau 70, assujetti par l'anneau en forme du coin 48, contre lequel la pulvérisation s'opère par le roulement du galet 2, à bandage 31, solidaire du battant 1, articulé et suspendu en 9-10 au moyeu 16 de la poulie en bois 17, par les tourillons 11, dont les boites peuvent se déplacer verticalement dans 16-21, garniture antifriction supportant par la garde filetée 20, réglable en 21, le moyeu 16 sur les montants 23, à boulons 63. 14, ressort appuyant 9 sur 16-12, arbre relié à 16 par le couvercle 13, à palier 22-23, et percé pour le graissage. 6-7, ventilateur aspi-

est fixée à l'extrémité d'un arbre suspendu à l'aide d'un joint universel à l'intérieur d'une poulie qui tourne à 200 tours par minute. Par le mouvement de rotation imprimé à la meule, celle-ci presse fortement contre l'anneau et roule en même temps sur lui ; les matières à broyer qui se trouvent projetées constamment sur l'anneau par des ailettes fixées à l'arbre sont broyées par la pression et le frottement de la meule contre l'anneau. D'autres ailettes fixées au-dessus de la meule produisent un courant d'air qui chasse les matières fines et les fait passer à travers le tamis qui surmonte l'anneau et entoure l'appareil ; la poussière est recueillie au-dessous et emmenée par une vis.

La matière à broyer doit être introduite dans l'appareil déjà réduite en grains de quelques millimètres. La production de ce broyeur serait de 1 500 kilogrammes à l'heure avec une mouture de 25 °/₀ sur le tamis de 4 900 mailles ; la force absorbée est seulement de 25 chevaux. Les parties qui s'usent sont l'anneau, la meule et les ailettes ; ces pièces se remplacent facilement et sont d'un prix relativement peu élevé.

Il existe beaucoup d'autres systèmes de broyeurs, tels que les moulins Askam, Taylor, etc., mais ceux que nous avons décrits plus haut ont seuls été employés et expérimentés sérieusement jusqu'à présent.

On a souvent reproché aux divers appareils broyeurs, employés depuis quelques années, de donner moins de poudre impalpable que les meules ; le tamis de 4 900 mailles ne retient en effet que des grains encore relativement gros, et pour apprécier la quantité d'impalpable contenue dans un ciment, il faudrait un tamis beaucoup plus fin. M. le Dr Michaëlis a exécuté une série d'essais pour élucider cette question ; il a employé pour classer la poudre en grains plus fins que ceux du tamis de 4 900 mailles la méthode par lévigation indiquée par Schöne, en remplaçant l'eau par l'alcool absolu.

Avec une vitesse de 0,4 millimètre par seconde, on obtient le

rant l'air dans le cône 25-44, et projetant les poussières sur la toile métallique 38. 4-5, agitateurs ramenant la matière sous le galet. 50, trémie à trappe 51 et regard 52, alimentant le broyeur par 55, 30, 32, au moyen de la vis 49, commandée, de 27, par le train 42, 40, 41, 61, 53, avec embrayage à friction 59, 60, empêchant tout accident.

même résultat que si l'on employait un tamis de 62 500 mailles par centimètre carré (tamis idéal dans lequel la grosseur du fil serait égale au vide de la maille). La vitesse de 1,18 millimètre par seconde correspond à un tamis ayant 15 000 mailles par centimètre carré.

Voici quels ont été les résultats constatés par le Dr Michaëlis sur du ciment moulu avec trois appareils différents :

	Meules	Moulin à boulets	Moulin Griffin
Résidu sur le tamis de 900 mailles	1,0	1,1	3,2
— à travers 900 —	23,0	31,4	19,2
— — 4 900 —	36,0	31,4	31,3
— — 15 000 —	17,3	14,8	21,9
— — 60 000 —	22,7	21,3	24,4

Blutage. — La poudre sortant des meules est envoyée dans les blutoirs où les parties qui n'ont pas été réduites en poudre assez fine sont éliminées et retournent aux meules. Ces blutoirs sont généralement composés de cylindres à section polygonale, semblables à ceux qui sont utilisés pour le blutage des chaux ; ils sont garnis de toile métallique n° 60, 70 et même 80, selon la finesse que l'on veut obtenir.

Un autre système s'est substitué, dans les usines allemandes notamment, au blutoir cylindrique, c'est le plan incliné à secousses de Nagel et Kaemp (*fig.* 56).

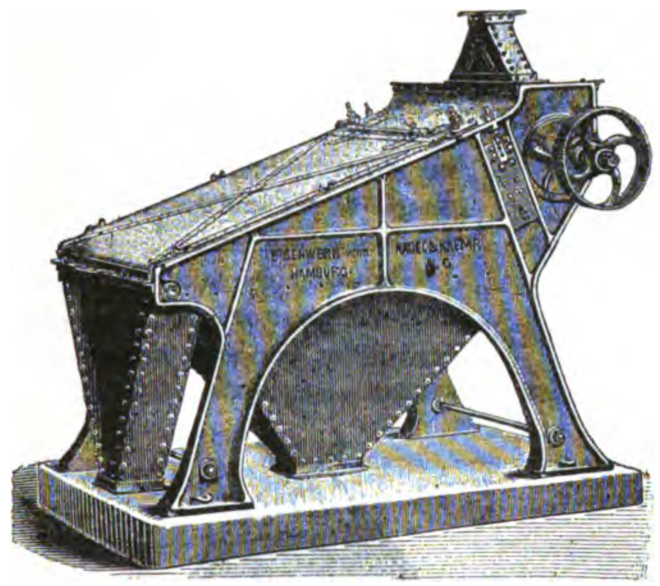


56. — Blutoir Nagel et Kaemp.

Le plan incliné est composé d'une tôle perforée ; la poudre arrive à la partie supérieure, descend sur le plan incliné et les secousses font passer à travers les trous de la tôle la poudre suffisamment fine; l'inclinaison du tamis peut être modifiée de manière à

obtenir la finesse que l'on désire. Le plan incliné est recouvert d'une toile de manière à éviter la poussière. Les blutoirs cylindriques sont également renfermés dans des caisses hermétiquement closes.

La maison Nagel et Kaemp a modifié le tamis à plan incliné et l'a remplacé par la bluterie à balançoire (*fig.* 57). Dans cet

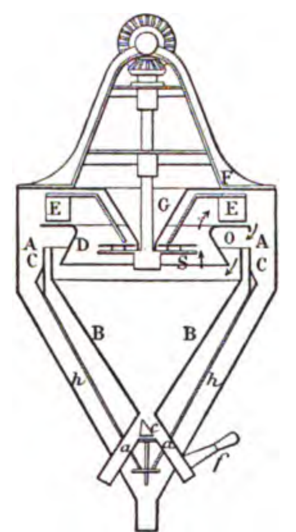


57. — Bluterie à balançoire de Nagel et Kaemp.

appareil, le tamis est beaucoup moins incliné et il est animé d'un mouvement rapide de va-et-vient.

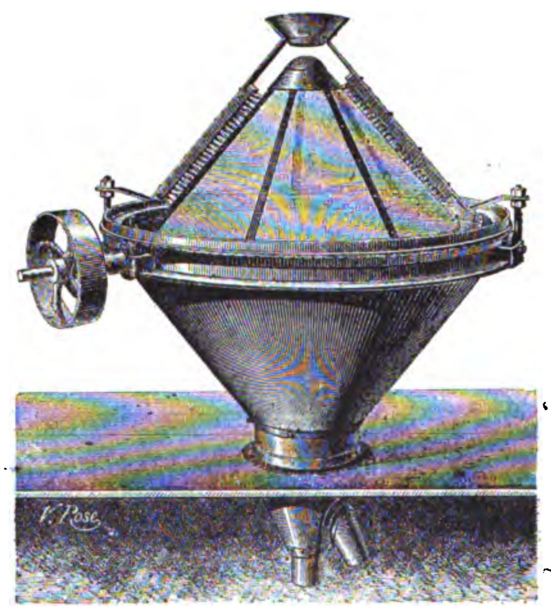
Le séparateur à ventilateur est aussi employé dans certains cas et remplace les bluteries, surtout quand on doit éliminer la poudre produite par un premier broyeur tandis que les refus sont envoyés dans un broyeur finisseur (*fig.* 58). La matière à bluter arrive par l'entonnoir O et se répand sur le plateau S; le mouvement de rotation du plateau projette la poudre en nappe mince; celle-ci est traversée par un courant d'air produit par le ventilateur E, les parties fines et légères sont entraînées, tombent en A et sont recueillies au bas du cône. Les grains encore trop gros retombent dans le cône intérieur B et sont ramenés au broyeur par les conduits A.

La bluterie cylindrique de Morel est fréquemment employée dans les usines du midi de la France. La figure 59 indique suffisamment clairement son fonctionnement pour qu'il soit nécessaire de la décrire. Les toiles métalliques n'étant jamais chargées et soumises à des chocs, comme dans les bluteries hexagonales, s'usent beaucoup moins vite et le fonctionnement de la bluterie est plus régulier ; les brosses nettoient constamment les toiles et assurent un débit constant. Cet appareil très simple et peu coûteux donne des résultats très satisfaisants.



58.— Séparateur à ventilateur.

Citons encore comme système de blutoirs destinés peut-être à remplacer tous les autres, par suite de leur rendement considérable, les planchisters employés maintenant couram-


59. — Blutoir à tamis coniques de Morel.

ment dans les moulins à blé. Ces appareils se composent de

tamis plans animés d'un mouvement de va et vient; des sortes de raclettes agitent constamment la matière sur le tamis et la font progresser d'une extrémité à l'autre.

La poudre fine est reprise à la sortie des blutoirs par des vis, des courroies transporteuses, etc..., et conduite aux magasins. Ceux-ci sont composés de grandes chambres d'une capacité de 200 à 600 mètres cubes. Le ciment est versé par le haut et on l'enlève par une porte ménagée à la partie inférieure.

Parfois, le ciment est déversé dans de grandes trémies munies en dessous d'orifices auxquels on peut fixer les sacs; le remplissage des sacs s'opère alors très rapidement; dans certaines usines on a même adapté à ces ensachoirs des romaines qui permettent d'introduire dans les sacs un poids uniforme de poudre.

Le ciment Portland artificiel bien fabriqué n'a pas besoin de rester en silos comme les ciments naturels; sa composition étant toujours régulière, on peut être certain qu'il ne contient pas de chaux libre non combinée dont il soit nécessaire d'attendre l'extinction. Les magasins, dans les fabriques de ciment, servent uniquement à mettre en réserve la fabrication pendant les mois où l'écoulement est moins actif.

3. Propriétés du ciment Portland. *Composition chimique.* — Les conditions indispensables à la production d'un ciment Portland de bonne qualité sont, d'une part, la régularité de composition chimique, d'autre part, l'homogénéité parfaite des éléments qui le constituent. Ces deux conditions sont absolument liées entre elles, car il est bien évident que si les matières sont bien dosées, mais le mélange imparfait, le produit ne pourra être que défectueux. Le ciment Portland est composé essentiellement de silice, d'alumine et de chaux; les autres éléments qui s'y trouvent en quantités appréciables sont l'oxyde de fer, la magnésie, l'acide sulfurique; accessoirement, il renferme quelquefois de la soude, de la potasse, du manganèse, etc... Dans les matières premières, il existe en outre de l'acide carbonique qui disparaît pendant la cuisson.

Nous avons dit que la pâte, au moment où elle est prête à

être enfournée, doit contenir 19 à 24 % d'argile et 76 à 81 % de carbonate de chaux. On désigne sous le nom d'argile la silice, l'alumine et l'oxyde de fer. En France, on s'écarte peu du dosage de 19 à 21 % d'argile ; en Angleterre et en Allemagne le dosage est plutôt compris entre 21 et 24 % d'argile.

Dans le tableau ci-après (page 95), nous donnons la composition des principaux ciments français et celle de quelques ciments anglais, allemands et belges.

Comme on le voit par les chiffres de ce tableau, la quantité de chaque élément varie dans les limites suivantes :

Silice	20,30	à	26,10
Alumine	5,20	à	10,60
Oxyde de fer	2,10	à	5,30
Chaux	58,12	à	67,31
Magnésie	0,33	à	2,30
Acide sulfurique	0,26	à	1,78

Bien que nous nous réservions de traiter à part les questions purement théoriques, nous devons dire dès maintenant quelques mots du rôle que l'on attribue à ces divers éléments pendant la cuisson.

A la température de 700 à 800° l'acide carbonique est expulsé et la chaux réagit sur l'alumine, la silice de l'oxyde et fer. Il est très probable que ces deux actions se produisent presque simultanément et que l'acide carbonique est, pour ainsi dire, déplacé par la silice, l'alumine et l'oxyde de fer. Il se forme du silicate, de l'aluminate et du ferrite de chaux, ces deux derniers sels étant d'abord en quantité prépondérante ; à mesure que la cuisson s'élève, la silice s'empare d'une plus grande quantité de chaux au détriment de l'aluminate et du ferrite, et finalement, si la quantité de chaux est suffisante, il se forme du silicate tricalcique, de l'aluminate tricalcique, et très peu de ferrite de chaux ; une petite quantité de silice, d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux reste à l'état de silicate multiple qui sert de fondant et constitue une matière inerte. M. Le Chatelier a fait voir que les ciments Portland cuits : « sont essentiellement for- « més d'un silicate de chaux différant peu de la formule SiO^2, « 3 CaO qui est l'élément actif du durcissement, et que le com-

Désignation des ciments	Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Perte au feu	Sable siliceux	Produits non dosés	Total
Ciments français	22,20	6,72	2,28	67,31	0,95	0,26	0,40	»	»	100,12*
	23,50	7,75	2,95	64,07	0,58	0,60	0,85	»	»	100,30
	21,70	7,48	2,57	65,54	0,90	0,77	1,20	»	»	100,16
	23,40	7,36	2,84	63,70	0,95	1,02	0,80	»	»	100,07
	24,50	7,09	2,81	62,40	0,85	0,70	1,25	»	0,40	100,00
	25,40	6,65	2,75	61,60	1,08	0,84	1,10	0,60	»	100,02
	21,80	6,56	2,64	57,42	0,72	0,34	0,40	0,12	»	100,00
	24 25	5,20	2,30	63,61	0,79	0,68	2,40	0,70	0,07	100,00
	22,30	8,04	3,71	58,68	2,20	2,23	2,55	0,25	0,04	100,00
	23,25	7,44	2,10	62,55	0,92	1,06	2,75	»	»	100,07
	23,00	8,33	3,87	60,90	1,10	1,40	1,49	»	»	100,09
	24,60	7,98	2,51	59,10	1,25	1,05	3,40	»	0,11	100,00
Ciments anglais	23,15	7,83	3,37	61,40	1,07	1,47	1,45	»	0,24	100,00
	23,30	7,65	3,10	62,20	1,04	1,06	1,60	»	0,05	100,00
	23,15	7,88	3,37	61,30	0,33	1,10	2,95	»	»	100,08
	23,70	7,80	3,40	59,36	0,55	1,25	4,10	»	»	100,06
	22,25	8,22	3,38	60,48	1,00	1,35	3,00	0,45	»	100,13
	21,95	7,99	3,91	59,08	1,04	1,52	4,35	0,35	»	100,19
	21,60	6,30	4,30	62,72	0,98	1,02	2,95	0,30	»	100,07
	21,35	7,15	3,75	62,16	0,95	1,06	3,20	0,25	0,13	100,00
	20,30	8,63	3,37	59,92	1,06	1,45	4,25	0,40	0,62	100,00
	23,30	8,13	2,67	60,48	0,60	1,20	3,90	»	»	100,28
	23,60	9,73	2,97	59,76	0,60	0,68	2,55	»	0,11	100,00
	24,05	8,69	3,31	59,69	0,90	1,47	1,85	»	0,25	100,00
	23,50	8,43	3,47	59,64	0,97	1,78	1,80	0,60	»	100,00
Ciments allemands	22,60	7,01	4,04	63,11	1,79	0 37	1,08	»	»	100,00
	21,75	8,16	3,64	63,39	2,30	0,51	0,25	»	»	100,00
	21,30	10,60	3,60	62,23	1,44	0,68	»	»	0,15	100,00*
	24,85	6,07	2,43	64,40	1,26	0 51	»	»	0,48	100,00*
	22,80	6,30	2,70	66,40	1,08	0,63	»	»	0,09	100,00*
	23,70	5,25	2,70	67,18	1,00	1,40	»	»	»	100,00*
	22,40	7,30	2,70	62,83	1,21	1,58	2,25	0,10	»	100,37
	22,80	7,46	2,84	63,28	1,24	0,98	1,55	0,20	»	100,35
	22,25	7,85	5,30	58,12	2,08	1,05	3,35	0 25	»	100,15
	20,80	8,66	3,64	62,52	1,68	0,89	1,85	0,10	»	100,14
	22,90	6,96	3,04	62,55	1,20	1,40	1,60	»	0,35	100,00
	23,20	7,40	2,40	61,82	1,15	1,33	2,50	»	0,20	100,00
	22,20	8,32	2,88	61,40	0,90	1,73	2,55	»	0,02	100,00
	21,00	8,23	3,37	62,10	1,03	1,47	2,80	»	»	100,05
Ciments belges	24,85	6,45	2,70	61,44	0,70	1,03	2,95	»	»	100,12
	24,50	8,51	2,84	60,03	0,88	1,54	1,20	0,60	»	100,10
	24,30	6,13	3,47	60,19	0,70	1,13	2,70	1,30	0,08	100,00
	23,80	6,39	2,51	62,32	0,72	1,17	2,94	»	0,14	100,00
	26,10	5,79	2,61	62,44	0,79	0,85	1,35	»	0,07	100,00
	24,30	5,33	2,67	64,12	0,72	0,74	1,95	»	0,17	100,00

* Analyses faites sur le ciment en roches.

« posé s'est produit par précipitation chimique au sein d'un « silicate multiple fondu qui a servi de véhicule à la silice et à « la chaux pour permettre leur combinaison, mais qui reste « sensiblement neutre pendant leur durcissement. »

D'après cela, on voit que si les terres contiennent de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer dans des rapports différents, on peut faire varier les proportions du mélange ; mais quand les matières présentent une composition constante, on doit rester dans des limites très étroites. Si le ciment contient un peu trop de chaux, celle-ci n'est pas saturée entièrement et il reste de la chaux libre. Comme il suffit de un demi pour cent de chaux libre pour donner lieu à des défauts très graves, on a intérêt à s'écarter un peu du dosage limite, car il est bien évident qu'en opérant sur de grandes masses on ne peut pas être absolument sûr de ne pas s'écarter de 0,5 % du chiffre que l'on se propose d'obtenir.

Mais si l'on force un peu trop la proportion d'argile, on observe aussitôt un autre inconvénient ; le ciment, après la cuisson, se réduit spontanément en poussière, et celle-ci, bien que n'étant pas absolument sans valeur, est loin cependant de donner les mêmes résultats que le ciment bien scorifié. Ce phénomène est dû à la présence du silicate bicalcique.

Des pâtes contenant une trop forte proportion d'argile peuvent cependant fournir un ciment qui ne se pulvérise pas dans le four ; mais alors il faut que la cuisson ne soit pas poussée jusqu'au commencement de fusion ; on obtient dans ce cas un ciment contenant une proportion plus forte d'aluminate de chaux et la prise est plus rapide.

L'excès d'argile est d'ailleurs beaucoup moins à craindre que l'excès de chaux, car il n'a pour inconvénient que de diminuer la résistance, mais il ne peut pas compromettre la solidité du mortier dans l'avenir.

M. Le Chatelier, dans ses recherches expérimentales sur la constitution des mortiers, a indiqué les règles précises qui permettent de fixer les limites extrêmes de composition que peuvent présenter les ciments Portland.

Il suffit, dit ce savant, de se rappeler qu'ils ne doivent pas, d'une part renfermer du tout de chaux libre, ce qui fixe un maximum à la proportion de chaux, et que, d'autre part, la présence d'une proportion trop forte de silicate dicalcique amène la pulvérisation spontanée au sortir du four, ce qui limite l'abaissement de la teneur en chaux.

1° *Limite supérieure de la teneur en chaux.* — En présence de quantités croissantes de chaux, les composés qui tendent à se former sont : SiO^2, 3CaO et Al^2O^3, 3CaO. Les silico-aluminates tendent à disparaître complètement. On devra donc avoir comme limite supérieure de la chaux :

$$(1) \qquad \frac{\text{CaO. MgO}}{SiO^2 + Al^2O^3} \leqslant 3.$$

Les quantités de chaque corps étant exprimées dans cette formule non pas en poids mais en équivalents. Je n'ai pas fait entrer en ligne de compte le sesquioxyde de fer, attendu que les ferrites de chaux gonflent et s'éteignent. Il ne faut donc pas saturer l'oxyde de fer de chaux.

2° *Limite inférieure de la teneur en chaux.* — En diminuant la chaux la proportion du silico-aluminate augmente, puis, lorsqu'il est complètement formé, il commence à se produire du silicate dicalcique SiO^2, 2CaO. La formule du silico-aluminate n'est pas connue. On sait seulement qu'il est au moins aussi calcaire que le plus calcaire de ceux qui sont connus jusqu'ici : la géhlénite 2 SiO^2, Al^2O^3, 3 CaO. Je lui attribue cette formule pour faire le calcul. On trouve alors comme limite inférieure du rapport des équivalents :

$$(2) \qquad \frac{\text{CaO. MgO}}{SiO^2 - (Al^2O^3, F^2O^3)} \geqslant 3.$$

Ici il ne faut pas séparer le fer et l'alumine qui se comportent de la même façon au point de vue de la production des silicates multiples.

Il est facile de s'assurer que les deux conditions énoncées ci-dessus sont satisfaites pour tous les ciments de bonne qualité fabriqués en France, ainsi que le montre le tableau suivant :

Provenance du ciment	Formules (1)	Formules (2)
Boulogne	2,22	3,60
Desvres	2,28	3,80
Frangey	2,55	4,05
Grenoble	2,40	3,90

Dans le cahier des charges du service maritime des ponts et chaussées il est prescrit que le rapport de la silice et de l'alumine à la chaux ne doit pas être inférieur à 0,44. Cependant un ciment provenant d'une pâte dosée à 20 °/₀ d'argile ne donne que 0,42 à 0,43 comme indice d'hydraulicité, et un pareil dosage peut être considéré comme satisfaisant. Si nous examinons, par exemple, le premier échantillon de ciment du tableau précédent, dont l'indice atteint à peine 0,43, nous voyons qu'il satisfait très bien aux formules (1) et (2).

Mais l'indice d'un ciment fini ne correspond pas absolument à l'indice de la pâte, celui-ci est toujours un peu plus faible. L'analyse d'un ciment tel qu'on le trouve dans le commerce ne donne pas une idée exacte de sa composition réelle. Les cendres des combustibles employés dans les fours contiennent beaucoup plus de silice et d'alumine que le ciment, et il suffit qu'il y en ait une très faible quantité mélangée à celui-ci pour que la composition se trouve modifiée. Voici quelques analyses de cendres des combustibles dont on se sert généralement pour la cuisson.

Provenance des combustibles	Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Produits non dosés	Total
Anthracite français	40,50	36,83	9,42	9,50	1,17	2,26	0,32	100,00
— anglais	40,10	42,80	4,70	8,10	0,90	1,23	2,17	100,00
Charbon gras français	35,50	37,65	7,85	11,75	1,44	1,95	3,86	100,00
— —	31,80	22,38	33,87	4,75	1,70	2,65	2,85	100,00
— anglais	41,50	25,50	11,90	12,30	1,64	4,30	2,86	100,00
— d'Ecosse. . . .	8,80	4,25	74,00	6,25	traces	5,12	1,58	100,00
Demi-gras français	36,70	33,39	12,36	9,37	1,30	6,51	0,37	100,00
— —	55,40	28,43	6,57	7,50	0,90	0,67	0,53	100,00
Coke de gaz anglais.	29,75	24,35	25,02	12,75	2,33	4,66	1,14	100,00
— —	20,20	14,29	50,46	7,50	2,28	4,80	0,47	100,00
— —	35,58	20,46	12,90	18,80	1,51	8,70	2,05	100,00
Coke métallurgique français .	43,10	28,43	18,32	2,50	1,35	1,25	5,05	100,00

Voici, d'autre part, l'analyse de deux échantillons de ciments en roches et de la poussière prise dans le même four.

	1		2	
	Roche	Poussière	Roche	Poussière
Silice	23,20	27,00	22,70	28,20
Alumine	7,05	8,15	7,17	7,80
Oxyde de fer	2,35	2,05	2,18	2,50
Chaux	66,10	61,15	66,35	59,48
Magnésie	0,65	0,49	0,80	0,95
Acide sulfurique	0,80	0,92	0,68	1,18
Matières non dosés	»	0,24	0,12	»
Total	100,15	100,00	100,00	100,11

Aussi, bien que l'indice d'hydraulicité des ciments de composition normale soit compris en réalité entre 0,42 et 0,48, on trouve dans le commerce des ciments dont l'indice s'élève jusqu'à 0,50 et même 0,60. Ces derniers sont d'ailleurs presque toujours des ciments de qualité inférieure, ils sont composés en grande partie de poussières de fours et proviennent de pâtes irrégulièrement dosées.

Finesse de mouture. — Le ciment bien cuit se présente à la sortie des fours sous la forme de roches noires ou noir-verdâtres ; ces roches ont une grande densité et sont très dures ; il faut pour les broyer employer des appareils très puissants qui produisent une poudre plus ou moins fine. Pour obtenir une finesse régulière, on fait passer cette poudre à travers un ou plusieurs tamis destinés à recueillir les grains qui ont échappé au broyage. Mais ces tamis ne peuvent pas être assez fins pour éliminer complètement tous les grains qui n'ont pu être réduits en poudre impalpable ; ils laissent passer aussi une certaine quantité de grains très fins. Ce sont ces grains qui donnent au ciment la rudesse au toucher ; à mesure que leur proportion diminue, la poudre devient plus douce.

Cette partie de la fabrication nécessite un contrôle incessant et des frais relativement élevés ; comme, d'un autre côté, nous verrons que la finesse joue un rôle considérable dans la résistance des mortiers, il est indispensable de s'assurer tout d'abord

si le ciment à essayer possède la finesse que la pratique indique comme suffisante.

Si l'on admettait que les grains, même extrêmement fins, constituent une matière inerte, il suffirait de déterminer la quantité de poudre impalpable contenue dans un ciment. Mais on serait dans l'erreur en considérant tous les grains comme inertes. Nous savons que ce sont des fragments de ciment et, si on les réduisait en poudre, ils constitueraient un excellent Portland ; ils proviennent, en effet, des roches les plus dures et par conséquent les mieux cuites ; s'ils n'ont pas d'action dans les phénomènes de la prise et de la solidification, c'est que leur volume est trop considérable. Mais tandis que les grains d'une certaine grosseur resteront complètement inertes, ceux qui sont très fins arriveront dans un temps plus ou moins éloigné à s'attaquer et à former des combinaisons actives. Il est donc nécessaire de déterminer non seulement la proportion des grains, mais aussi leur grosseur.

On divise généralement les grains contenus dans un ciment en trois catégories : la première comprend les grains qui restent sur un tamis ayant 324 mailles par centimètre carré ; la seconde se compose des grains qui ont traversé le tamis de 324 mailles, mais qui sont retenus par un tamis de 900 mailles par centimètre carré ; enfin dans la troisième se trouvent les grains très fins qui, après avoir traversé le tamis de 900 mailles, sont refusés par un tamis ayant 4 900 mailles par centimètre carré (1). On obtiendrait un résidu encore plus fin en se servant de tamis de soie ; ce qui passe à travers ce tamis peut être considéré comme de l'impalpable.

Lorsque nous examinerons la résistance des mortiers, nous verrons quel est le rôle des grains selon leur grosseur ; nous dirons seulement dès maintenant que les grains refusés par les tamis de 900 et de 324 mailles peuvent être considérés comme inertes ; leur présence diminue donc la valeur d'un ciment ; quand à ceux qui ont traversé le tamis de 900 mailles et qui sont restés sur le tamis de soie et sur celui de 4 900 mailles, on

(1) Dans le commerce, ces trois tamis portent les n°s 50, 80 et 200.

peut admettre que, s'ils ne sont pas attaqués dès le principe, ils ne tarderont pas à l'être et ils concourent en définitive à la résistance.

Généralement, lorsque l'on détermine la proportion des résidus contenus dans un ciment, on commence par en passer un poids déterminé au tamis le plus fin, celui de 4 900 mailles, par exemple ; ce qui est refusé par ce tamis constitue le résidu total sur le tamis de 4 900 mailles ; on passe ensuite ces grains au tamis de 900 mailles et on obtient le résidu total sur ce tamis ; enfin il suffit de passer ce résidu au tamis de 324 mailles sur lequel il ne reste plus que les gros grains.

Cette manière d'opérer est plus rapide, et si on veut avoir les proportions exactes par grosseur, on les obtient par de simples soustractions.

Pendant très longtemps, on a attaché peu d'importance à la finesse de mouture, et cela tient à des causes que nous expliquerons en examinant la résistance des mortiers. Il a fallu que des essais répétés viennent démontrer de la façon la plus péremptoire quelle augmentation de qualité on donnait au ciment en le réduisant en poudre aussi fine que possible pour que l'on arrive à rendre la mouture plus parfaite.

Il y a quelques années, les ciments laissaient jusqu'à 8 et 10 0/0 de résidu sur le tamis de 324 mailles, 15 à 20 sur celui de 900 mailles et 40 à 50 sur celui de 4 900 mailles. Depuis le nouveau cahier des charges du service maritime des Ponts et Chaussées, les exigences étant devenues plus grandes en ce qui concerne la résistance du mortier, les fabricants ont dû se mettre en mesure d'augmenter la finesse de mouture, et actuellement les ciments de bonne fabrication présentent une grande finesse. Le résidu sur le tamis de 324 mailles est nul, sur le tamis de 900 mailles il n'en reste que 5 à 6 0/0 et 25 à 30 0/0 sur celui de 4 900 mailles.

Pour connaître la finesse de mouture d'un ciment, il ne suffit pas de déterminer le résidu obtenu avec un seul tamis ; il n'existe pas, en effet, de relation assez bien établie entre les résidus des quatre tamis d'essais pour que de la connaissance d'un seul on puisse en déduire les autres.

Si l'on avait à examiner un ciment de même provenance, moulu et bluté avec les mêmes appareils, cette relation pourrait cependant être établie avec une exactitude suffisante pour donner d'utiles renseignements ; mais entre plusieurs ciments moulus et blutés avec des appareils différents, il existe d'assez grandes variations.

Les résultats du paragraphe nº 1 du tableau nº 2 donnent les quantités de résidus trouvés aux divers tamis à mesure que le ciment est soumis à une mouture de plus en plus fine. Ces chiffres sont les moyennes d'un nombre considérable d'essais faits sur des ciments fabriqués constamment de la même façon. A de très rares exceptions près, nous avons trouvé une relation constante entre les résidus ; par exemple, si l'on obtenait 5 % de résidus au tamis de 900 mailles, on en trouvait 33 à 35 sur celui de 4 900 et 44 à 46 sur celui de soie.

L'essai nº 2 a été fait sur un seul échantillon de roches qui ont été moulues dans la même journée; on a commencé par produire une poudre grossière et on a augmenté ensuite progressivement la finesse ; le ciment était bluté en sortant de la meule.

On a opéré de la même façon pour l'essai nº 3, mais le ciment n'a pas été bluté ; les échantillons ont été pris directement à la sortie de la meule ; on n'a employé que des roches pures.

Enfin dans l'essai nº 4, les échantillons ont été également pris à la sortie de la meule, mais on avait mélangé aux roches 20 % de poussières lourdes.

Les chiffres du tableau nº 2 ont été obtenus en déterminant le résidu total laissé sur chaque tamis ; dans le tableau nº 3 nous avons représenté ces mêmes résultats sous une autre forme, en indiquant dans chaque cas la quantité pour 100 du ciment initial qui reste entre deux tamis successifs ; nous divisons ainsi les grains en 5 catégories selon leur dimension, ce qui rend mieux compte de la composition du résidu. Il est évident que cette division n'a rien d'absolu, car il passe encore au tamis de soie des grains extrêmement fins qui ne sont pas encore de la poudre impalpable ; on pourrait également diviser les grains

par grosseur en se servant d'un plus grand nombre de tamis.

Mais, comme il suffit de représenter d'une façon aussi simple que possible la composition du résidu total et de donner une idée de la progression des grains selon leur volume à mesure que la mouture devient plus grossière, on peut très bien se borner aux quatre tamis dont nous nous sommes servis.

Le fait le plus saillant que l'on constate en examinant les graphiques que l'on trouvera à la suite du tableau 43 est l'augmentation de la proportion des grains très fins à mesure que ceux des tamis de 324, 900 et 4 900 mailles disparaissent. Le résidu du tamis de 4 900 commence seulement à diminuer lorsque les gros grains ont été presque complètement éliminés. On voit donc combien il est indispensable, pour obtenir une bonne mouture, de chercher non seulement à éliminer complètement le résidu du tamis de 324 mailles, mais aussi à rendre celui du tamis de 900 mailles aussi faible que possible.

L'augmentation des grains très fins, à mesure que le résidu du tamis de 4 900 diminue, montre la difficulté d'arriver à l'extrême finesse; il semble qu'à partir d'un certain point on ne puisse plus obtenir une quantité plus considérable de poudre impalpable.

Les ciments peu cuits donnent une proportion relativement moins considérable de grains fins ; des résidus de 6 à 8 °/₀ sur le tamis de 900 mailles correspondent à 25 à 28 °/₀ sur celui de 4 900 mailles et à 35 à 38 °/₀ sur celui de soie.

Bien que l'on ne puisse pas, d'après la proportion des résidus, juger si un ciment est bien ou mal cuit, on peut cependant suspecter la qualité d'un ciment lorsque l'écart entre les résidus des tamis de 900 et de 4 900 mailles est peu élevé ; si on trouve par exemple 10 à 15 °/₀ au premier et 20 à 25 °/₀ au second.

Il n'est pas nécessaire de se servir de tamis pour éliminer les grains contenus dans un ciment ; on peut employer d'autres moyens, par exemple délayer le ciment dans un verre avec une grande quantité d'eau en agitant vivement pendant un certain temps ; on laisse le dépôt se faire pendant quelques instants, puis on enlève les parties très fines qui restent en suspension ; on

ajoute de nouveau de l'eau, on agite et on répète la même opération jusqu'à ce que le résidu soit bien net, et que l'eau ne se trouble plus. Au lieu d'eau on peut se servir d'essence de thérébentine ; mais par ce moyen on ne peut obtenir que le résidu total et les résultats dépendent beaucoup de la manière d'opérer. Avec une habitude assez grande, on peut, il est vrai, arriver à doser ainsi très exactement la quantité de poudre impalpable contenue dans le ciment. Mais cette opération est toujours délicate ; l'emploi des tamis est préférable, car il ne présente aucune difficulté ; les résultats obtenus, peut-être un peu moins rigoureux, sont plus complets et en fait plus pratiques. On peut se contenter des tamis de 324, 900 et 4 900 mailles ; le tamis de soie ne doit être employé que pour des recherches spéciales.

Densité. — On désigne sous le nom de densité d'un ciment le poids d'un volume déterminé de ce ciment en poudre, ce volume étant mesuré de manière à obtenir le minimum de tassement. Il s'agit donc de la densité apparente et non de la densité réelle ou poids spécifique. Lorsque l'on détermine le poids spécifique, on peut prendre un poids ou un volume quelconque, le rapport est toujours le même ; il n'en est pas ainsi pour la densité apparente, dès que le volume mesuré augmente, le rapport entre le poids trouvé et ce volume devient aussi plus considérable. Avec un même ciment, on obtient, par exemple, 1,150 pour le poids de 10 centimètres cubes 1,250 pour celui de 1 litre et de 1,450 si l'on se sert d'un hectolitre. On s'explique facilement qu'il en soit ainsi, car, malgré toutes les précautions, il se produit toujours un léger tassement dans la mesure et il est évident qu'il est d'autant plus considérable que le volume de la poudre devient plus grand. Il est donc indispensable, si l'on veut obtenir des résultats comparables, de se servir toujours de la même mesure ; on emploie généralement le litre.

Dans tous les cas, quand on parle de la densité d'un ciment, il faudrait s'exprimer ainsi : tel volume pèse tant ; dire qu'un

ciment a une densité de 1,2 ou de 1,3 n'a en effet aucun sens précis.

Comme on cherche à obtenir le minimum de tassement, il faut opérer toujours de la même façon pour verser le ciment dans la mesure.

La densité en elle-même, et déterminée isolément, ne peut donner aucune indication sur la valeur d'un ciment ; en même temps qu'elle, il est absolument nécessaire de constater la finesse de mouture ; nous allons voir, en effet, que ces deux éléments sont intimement liés entre eux.

Les essais du tableau n° 3 suffisent déjà à montrer clairement que la densité, pour un même ciment, devient de plus en plus faible à mesure que la finesse augmente ; nous voyons, par exemple, un ciment accusant une densité de 1 510 grammes avec un résidu de 62 % au tamis de 4 900 mailles, arriver à donner seulement 1 094 grammes lorsque le résidu est descendu à 9 %.

Nous pouvons encore démontrer l'influence du résidu sur la densité d'une autre façon. Commençons par déterminer la densité d'un ciment dont le résidu sur le tamis de 4 900 mailles est, par exemple, de 40 %, nous trouvons 1 300 grammes à 1 350 grammes; passons maintenant le ciment au tamis de 4 900 mailles, et reprenons la poudre qui a traversé le tamis; le poids d'un litre de cette poudre n'est plus que 1 050 à 1 100 grammes.

Si maintenant nous reprenons le résidu laissé sur le tamis et que nous en mélangions à la poudre fine 10 %, puis 20 %, etc., jusqu'à 50 %, nous observons à chaque addition une augmentation de densité.

Les essais du tableau n° 4 ont été faits de cette façon. On voit que, à chaque augmentation ou diminution du résidu, correspond toujours une variation sensible de la densité.

Il est inutile d'insister plus longtemps sur un fait que l'expérience démontre aussi facilement et que l'on constate, d'ailleurs, pour toutes les matières réduites en poudre.

Ces variations de la densité selon la finesse du ciment sont surtout très sensibles quand on emploie une mesure de un litre et que la poudre est mesurée sans tassement. En pratique, les

différences sont beaucoup plus faibles; le ciment en sac, en baril ou en vrac est toujours plus ou moins tassé et l'influence du résidu est alors beaucoup moindre.

On a pensé pendant longtemps que la densité pouvait indiquer si le ciment avait été plus ou moins bien cuit. Il y a quelques années c'était là, en effet, une idée à peu près exacte et l'on pouvait dire avec raison que plus un ciment était lourd et plus sa cuisson était parfaite. C'est que l'on n'attachait pas une grande importance à la finesse de mouture et comme les ciments très cuits sont difficiles à réduire en poudre fine, ils contenaient, une fois moulus, 40 à 50 °/₀ de résidu sur le tamis de 4 900 mailles et la poudre avait une densité élevée qui dépassait généralement 1 300 grammes pour le poids du litre. Les ciments peu cuits, au contraire, sont bien plus faciles à moudre, et sans chercher à produire du ciment fin, avec des roches imparfaitement cuites, on obtient une poudre fine laissant seulement 25 à 35 °/₀ de résidu sur le tamis de 4 900 mailles; la densité, de ce fait seul, s'abaisse à 1 150-1 200 grammes pour le poids du litre.

L'importance que l'on attachait à la densité se justifiait ainsi très bien et il était logique d'admettre que les ciments légers étaient peu cuits; mais aujourd'hui que les ciments les plus durs sont réduits en poudre assez fine pour ne laisser que 25 à 35 °/₀ de résidu sur le tamis de 4 900 mailles, ils arrivent aussi à ne donner, au litre, que 1 200 à 1 250 grammes. Nous avons reconnu que des ciments provenant de roches ayant atteint des degrés de cuisson très différents présentaient des densités à peu près semblables quand la poudre avait exactement le même degré de finesse.

Ainsi, on ne doit pas chercher une indication sur la cuisson plus ou moins parfaite d'un ciment par la densité. Cet essai n'est utile que si l'on veut se rendre compte du degré de pureté du ciment. L'introduction de matières étrangères peut, en effet, faire varier la densité d'une façon assez sensible. Les poussières de fours ont également une densité notablement moins élevée que la poudre provenant de la mouture des roches.

Mais, pour obtenir une donnée sérieuse, on ne peut pas se

contenter de déterminer le poids du litre du ciment tel quel, même en tenant compte de la finesse, car un ciment qui serait composé de roches très cuites mélangées avec une assez grande proportion de poussières pourrait présenter une densité assez élevée avec une mouture relativement fine ; les roches dures constitueraient presque entièrement le résidu. Il faut donc commencer par éliminer les grains d'un volume appréciable ; on détermine ensuite la densité de la poudre fine.

En passant le ciment au tamis de 4 900 mailles, et en opérant sur la poudre qui a traversé ce tamis, on ramène d'abord tous les ciments à peu près au même degré de finesse ; on observe de plus des différences très importantes si le ciment n'est pas pur. Ainsi, quand le ciment provient entièrement de la mouture de roches bien scorifiées, la poudre qui a traversé le tamis de 4 900 mailles donne plus de 1 kilogramme pour le poids du litre. Quand la proportion de poussières de fours mélangées aux roches est un peu élevée, ou que l'on a mélangé au ciment des scories ou d'autres impuretés, le poids du litre s'abaisse au dessous de 1 kilogramme. Le tableau n° 5 donne quelques résultats constatés sur des ciments de diverses provenances.

Il est évident que le tamisage du ciment doit être fait aussi complètement que possible afin de ne laisser sur le tamis que le résidu ; si on se contentait de passer seulement une partie du ciment, comme c'est la poudre extrêmement fine qui passe la première, on aurait un résultat un peu plus faible (1).

Au lieu de déterminer le poids d'un litre de ciment en ver-

(1) Le point délicat dans le tamisage d'un ciment est précisément de faire passer toute la fine poussière et de ne conserver sur le tamis que les grains d'un diamètre plus grand que celui des mailles. D'après M. Féret (*Annales des ponts et chaussées*, mars 1890), si on prolonge suffisamment le tamisage, on arrive à faire passer une proportion assez grande de grains d'un diamètre supérieur à celui des mailles, et par suite les données de l'expérience deviennent très incertaines. Il nous paraît cependant que, dans le cas du tamisage à la main, on obtient très facilement des résultats suffisamment réguliers, en prenant la précaution de ne s'arrêter qu'au moment où la proportion des grains qui traversent le tamis est devenue presque nulle. En continuant à agiter le tamis, il en passerait bien encore, il est vrai, mais il faudrait un temps très long pour diminuer de 1 à 2 % ce qui reste sur le tamis. On peut s'en rendre compte très facilement en tamisant un certain temps et en pesant le résidu à inter-

sant la poudre de manière à obtenir le minimum de tassement, on cherche quelquefois à produire, au contraire, un tassement

valles réguliers. Voici ce que nous a donné une expérience exécutée de cette façon :

Temps écoulé depuis le commencement du tamisage.	Résidu restant sur le tamis de 4 900 m.
—	—
5 minutes	29,6 %
10 —	29,1 —
15 —	28,7 —
20 —	28,4 —
25 —	28,1 —
30 —	28,0 —
35 —	27,9 —
40 —	27,7 —

Le moment où le résidu ne passe presque plus est donc assez précis pour qu'il n'y ait aucune incertitude sur le moment où l'on doit s'arrêter ; en supposant que l'on continue le tamisage très longtemps, la différence pourrait tout au plus atteindre 1,5 % ce qui est insignifiant pour de pareils essais.

Si on emploie des machines pour exécuter le tamisage, il faut éviter que celles-ci impriment au tamis des secousses trop fortes, capables de faire vibrer les fils et de les écarter. Dans ce cas, on arriverait certainement, dans un temps relativement court, à faire passer presque tout le résidu qui serait resté sur le tamis de 4 900 mailles. Il est préférable de se servir d'un appareil imprimant au tamis des secousses qui ne peuvent pas être beaucoup plus fortes que celles que l'on donnerait avec la main. Cette condition est réalisée avec la machine dont nous nous servons depuis plusieurs années. Elle se compose essentiellement d'un plateau animé d'un mouvement de va-et-vient très court ; sur ce plateau est fixée une couronne en tôle d'un diamètre supérieur de 0,01 à 0,02 à celui du tamis ; à l'intérieur de la couronne le plateau est percé d'une ouverture d'un diamètre plus petit que celui du tamis. Il reste donc un espace annulaire dans lequel le tamis peut se mouvoir ; le mouvement de va-et-vient du plateau agite le tamis et lui donne des secousses très fréquentes, mais assez faibles et d'une égale intensité. La poudre est recueillie dans une trémie placée au dessous du plateau.

Quand on tamise une assez grande quantité de ciment pour obtenir le poids du litre de fine poussière, il est bon, comme moyen de contrôle, de prendre un poids déterminé de ciment, sur lequel on a déjà examiné quelle était la proportion du résidu sur le tamis de 4 900 mailles. et de pousser le tamisage jusqu'à ce que l'on ait obtenu la même proportion de résidu. Si, par exemple, on a à expérimenter un ciment laissant 30 % de résidu sur le tamis de 4 900 mailles, en tamisant 2 kilogrammes de ce ciment, il faudra, à la fin de l'opération, retrouver 600 grammes de résidu et 1,400 grammes de fine poussière. La détermination préalable de la proportion de résidu doit toujours se faire par un tamisage à la main.

aussi complet que possible ; cette méthode est très usitée en Allemagne. On frappe constamment la mesure pendant que l'on verse le ciment et on en ajoute ainsi jusqu'à refus. La densité obtenue de cette manière est très élevée ; elle varie de 1kg, 900 à 2kg, 200 pour le poids du litre. Mais on n'obtient pas des résultats plus réguliers et l'influence du résidu est toujours très sensible ; il y a donc peu d'avantage à employer cette méthode qui demande d'ailleurs beaucoup plus de temps.

Poids spécifique. — Le poids spécifique du ciment Portland est compris entre 3,050 et 3,175. La détermination du poids spécifique peut se faire avec une grande précision à l'aide de divers instruments et elle a l'avantage de ne pas être influencée par la finesse plus ou moins grande de la poudre ; on peut opérer sur le ciment tel quel, sans tamisage préalable.

On pourrait croire que le poids spécifique varie avec la cuisson et que des roches cuites imparfaitement doivent donner un chiffre moins élevé que des roches bien scorifiées, mais les variations sont très faibles. Nous avons examiné la densité de 5 échantillons de roches à des degrés de cuisson de moins en moins élevés ; ces roches ont été pulvérisées et on a trouvé les résultats suivants :

	Poids spécifiques
N° 1 : Roches paraissant surcuites	3,149
N° 2 : Roches noires, cuisson normale	3,154
N° 3 : Roches vert-clair	3,115
N° 4 : Roches grises	3,113
N° 5 : Roches gris-jaunâtre	3,108

Ces résultats confirment ce que nous avons dit au sujet de la densité apparente ; ils peuvent paraître surprenants quand on sait combien les roches imparfaitement cuites paraissent plus légères que les roches noires bien scorifiées. Cela tient sans doute à ce que les combinaisons sont peu différentes, quel que soit le degré de cuisson ; celle-ci aurait surtout pour effet de rapprocher les molécules.

L'introduction de matières étrangères dans le ciment, ne

quantité un peu importante, est immédiatement décelée par l'examen du poids spécifique. La fraude la plus usitée consiste à ajouter au ciment des laitiers de hauts-fourneaux ; ces laitiers ont une densité de 2,8 environ ; une proportion un peu notable de laitier dans le ciment abaisserait la densité au-dessous de 3,05, chiffre qui peut être considéré comme le plus bas que l'on puisse tolérer.

Comme pour la densité apparente, le contact prolongé de l'air humide a pour effet de diminuer le poids spécifique. Ainsi, un ciment qui présentait, quelques jours après la mouture, un poids spécifique de 3,130, n'a donné que 3,058 après un séjour de 6 mois en sac.

On trouvera dans le tableau ci-après les poids spécifiques de divers produits hydrauliques.

Poids spécifiques de divers produits hydrauliques

Ciments Portland artificiels	Ciment français	3,067
	id.	3,173
	id.	3,110
	id.	3,095
	id.	3,144
	Ciment belge	3,053
	id.	3,123
	id.	3,105
	Ciment allemand	3,076
	id.	3,105
	id.	3,060
	Ciment anglais	3,125
	Ciment à prise rapide	2,950
	id.	3,000
	Ciment mixte demi-lent	2,996
	id. lent	2,985
	id. demi-lent	2,907
	id. lent	2,923
	Ciment Portland naturel très lent	3,007
	id. demi-lent	3,012
	Ciment de grappiers	2,932
	id.	2,940
	id.	2,923
	Chaux du Teil	2,764
	Chaux de Beffes	2,691
	Ciment de laitier	2,747
	id.	2,759
	id.	2,717
	id.	2,761

Prise (1). — Lorsque l'on mélange le ciment en poudre avec de l'eau de manière à former une pâte plastique, on constate que cette pâte commence, après un temps plus ou moins long, à prendre une certaine consistance ; elle continue alors à se raffermir de plus en plus et elle présente bientôt une résistance appréciable soit à la rupture, soit à la pression. Ce phénomène constitue ce que l'on appelle la prise du ciment.

Pour apprécier d'une manière uniforme le temps nécessaire à un ciment pour faire prise, on admet que celle-ci s'est effectuée lorsque la pâte de ciment est assez résistante pour supporter sans dépression une aiguille dont la base limée carrément présente une section de 1 millimètre carré et dont le poids total est de 300 grammes ; on lui donne le nom d'aiguille Vicat.

Généralement on se contente de constater combien de temps il s'est écoulé depuis le gâchage du ciment jusqu'au moment où il peut supporter l'aiguille et on a ainsi ce que l'on appelle la durée de prise. Mais ce renseignement est insuffisant. Il est, en effet, bien plus intéressant de savoir à quel moment commence la prise, car, dès qu'un ciment commence à prendre, on ne peut plus lui faire subir de manipulation, sans compromettre la résistance ultérieure (2).

Bien qu'il soit parfois assez difficile d'observer le moment précis où la prise commence à se manifester, on peut cependant le déterminer avec une exactitude suffisante. La pâte de ciment étant placée dans un récipient de 4 centimètres de hauteur, on admet que la prise commence lorsque l'aiguille Vicat ne peut plus la traverser complètement.

Quand un ciment prend assez rapidement, il se produit, au moment de la prise, une élévation de température qui peut atteindre plusieurs degrés ; le thermomètre indique alors très nettement à quel moment la prise commence à se manifester. Avec des ciments prenant très lentement, l'élévation de température est à peine sensible.

Les expressions : commencement et fin de prise, ne sont pas absolument exactes car, en réalité, il n'y a pas de fin de prise ;

(1) Voir annexe. — *La prise du ciment Portland et ses anomalies.*

(2) Voir annexe. — I. *Influence du rebattage sur la qualité des mortiers.*

la prise se produit à un moment donné ; c'est-à-dire que la pâte perd la consistance plastique et commence à se solidifier, puis à partir de ce moment elle devient de plus en plus dure. Ce que l'on désigne sous le nom de fin de prise n'est autre chose que le moment où le mortier a atteint un certain degré de solidité.

Cependant il n'est pas inutile de constater, comme on le fait, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus, c'est-à-dire l'instant où la prise se manifeste, et celui où l'aiguille ne peut plus pénétrer dans la masse du mortier. Certains ciments prennent assez rapidement mais ils n'acquièrent qu'au bout de plusieurs heures une dureté suffisante pour empêcher complétement la pénétration de l'aiguille. Avec d'autres ciments, au contraire, la prise ne se produit qu'au bout de plusieurs minutes, mais en très peu de temps la pâte est assez dure pour supporter l'aiguille ; les ciments à prise rapide sont caractérisés par cette allure de la prise et du durcissement ; tandis qu'avec les ciments à prise lente il s'écoule généralement un temps assez long entre le commencement et la fin de prise.

Comme nous le verrons plus loin, l'emploi d'un grand excès d'eau pour le gâchage ne modifie pas beaucoup la durée de prise des premiers, tandis qu'il ralentit très notablement la prise des seconds. Il en résulte que dans la pratique, où les ciments sont toujours employés mélangés avec du sable, et gâchés, par conséquent, avec un excès d'eau, les mortiers de ciment prompt conservent une prise presque aussi rapide que celle du ciment pur ; les mortiers faits avec des ciments lents prennent au contraire beaucoup plus lentement.

Non seulement tous les ciments ne font pas prise de la même façon, mais le temps qui leur est nécessaire pour prendre est modifié par une foule de circonstances dont les principales sont : la température de l'eau de gâchage, celle du ciment et celle de l'air ambiant, la quantité d'eau de gâchage, la nature de l'eau, le temps écoulé depuis la fabrication du ciment, sa conservation plus ou moins parfaite, la finesse de la poudre.

Température. — La température joue un rôle très important

dans la prise des ciments. Le même ciment gâché avec de l'eau froide ou chaude peut prendre en 4 à 5 heures ou en 10 à 15 minutes. L'influence du froid et de la chaleur est surtout très considérable lorsque l'eau et le ciment se trouvent à la même température ; ainsi, en gâchant du ciment à 30° avec de l'eau à 30° également, la prise est presque toujours immédiate, tandis que le même ciment à 10 ou 12° peut être gâché avec de l'eau à 40 et 45° et ne prendre qu'en 20 minutes et même davantage ; et, inversement, du ciment chaud peut se gâcher facilement avec de l'eau très froide. (Tableau n° 6).

La température de l'air ambiant influe moins sur la prise que celle du ciment et de l'eau, surtout si pour déterminer la prise on remplit de pâte de ciment un récipient d'une certaine hauteur ; son influence est beaucoup plus sensible quand on se contente de former une galette de faible épaisseur sur une plaque de verre ou de métal.

Dans certains cas, la température élevée de l'air peut être la cause d'un fait que l'on attribue souvent, et à tort, à la qualité du ciment ; ce sont les petites plaques de quelques millimètres d'épaisseur qui se détachent parfois des maçonneries quelques jours après leur confection. La même chose se produit également sur les briquettes d'essais et c'est alors surtout qu'il est facile de se rendre compte de la cause de ce phénomène ; il ne se produit d'ailleurs qu'avec des ciments à prise très lente. Si l'on gâche du ciment avec de l'eau assez froide et que l'on abandonne la briquette dans un milieu à température élevée, la surface du mortier ne tarde pas à prendre la même température ; la prise se produit en formant une croûte mince isolant le reste de la masse et empêchant l'évaporation de l'eau qu'elle contient en excès ; l'intérieur de la briquette fait prise alors très lentement et comme il se produit un léger tassement et un afflux de l'eau en excès à la partie supérieure, la croûte mince de la surface se trouve isolée du reste du mortier et, avec le moindre effort, on peut l'enlever.

D'ailleurs, si ce soulèvement provenait du ciment, il se produirait aussi bien après l'immersion, à la partie inférieure et sur les côtés de la briquette ; or ce fait ne se présente jamais.

Lorsque cet effet se produit dans les maçonneries, on peut l'attribuer à la même cause ; mais alors vient encore s'ajouter l'influence du lissage à la truelle, qui détermine toujours un afflux de ciment à la surface du mortier et qui augmente ainsi, par ce fait, la rapidité de prise de celle-ci.

Avec des ciments à prise prompte ou moyennement lente, on n'observe jamais de soulèvement.

Quand on examine la prise d'un ciment, il est indispensable de veiller à ce que la température du ciment, celle de l'eau et celle du local où se fait l'essai soient autant que possible entre 12 et 18°.

Quantité d'eau de gâchage. — La quantité d'eau employée pour réduire le ciment en pâte a sur la prise une influence non moins importante que la température. Le ciment prend d'autant plus lentement que la quantité d'eau de gâchage est plus élevée, mais, comme nous l'avons dit plus haut, le ralentissement de la prise ne se produit pas également pour tous les ciments ; pour quelques-uns il n'est que de quelques minutes et pour d'autres il atteint plusieurs heures. C'est pourquoi certains ciments dont la prise est assez rapide quand ils sont gâchés purs, prennent très lentement quand ils sont mélangés avec du sable. Il faut, en effet, une quantité d'eau beaucoup plus grande pour gâcher un mortier que pour le ciment pur ; ainsi, pour gâcher les ciments en pâte pure, on emploie 24 à 28 °/₀ d'eau ; un mélange de une partie de ciment pour une partie de sable en demande 18 à 20 °/₀ c'est-à-dire 36 à 40 °/₀ du poids du ciment ; pour gâcher un mélange de 1 de ciment pour 3 de sable il faut 13 à 15 °/₀ d'eau du poids du mortier, soit 52 à 60 °/₀ du poids du ciment.

En examinant les résultats exposés dans le tableau n° 6 on verra que pour certains ciments la durée de prise du ciment pur ne diffère pas beaucoup de celle du mortier 1 : 1 (n°s 1, 3, 4, 6, 10); la prise de ces mêmes ciments est peu influencée par un excès d'eau de gâchage. Au contraire, ceux dont la prise est très sensiblement ralentie par une augmentation de la quantité d'eau de gâchage prennent bien plus lentement

quand ils sont mélangés avec du sable que lorsqu'ils sont gâchés purs.

Nature de l'eau de gâchage. — La nature de l'eau de gâchage joue un rôle important dans la prise des ciments. Quand l'eau contient en dissolution certains sels tels que le chlorure de calcium, le sulfate de chaux, etc., la prise est plus lente que si l'eau est pure. Avec d'autres sels, au contraire, tels que la carbonate de soude ou de potasse, la prise est plus rapide.

D'une manière générale, les sels qui retardent la prise sont sans action chimique sur la chaux ; mais ils existent rarement tout formés dans les eaux naturelles; ils se trouvent produits le plus souvent par suite d'une double décomposition; ainsi le chlorure de magnésium et le sulfate de magnésie, qui se trouvent en assez notable quantité dans l'eau de mer, donnent naissance, en présence de la chaux du ciment, à du chlorure de calcium et à du sulfate de chaux. Nous avons fait voir que ces deux sels retardaient la prise parce qu'ils empêchent la dissolution de l'aluminate de chaux. (Voir annexe I).

La prise est toujours plus lente quand on emploie de l'eau de mer pour le gâchage ; ainsi certains ciments, qui prennent en quelques minutes à l'eau douce, mettent plusieurs heures à faire prise quand ils sont gâchés avec de l'eau de mer. Avec d'autres ciments on observe une différence beaucoup moindre, mais, dans tous les cas, la prise à l'eau de mer est plus lente.

Les ciments dont l'indice d'hydraulicité est élevé et dont la cuisson n'a pas été poussée jusqu'à complète vitrification prennent rapidement, aussi bien à l'eau douce qu'à l'eau de mer; les ciments dont l'indice est voisin de la limite inférieure ont presque toujours une prise très lente à l'eau de mer.

Si le ciment est resté pendant longtemps en magasin et qu'il est un peu éventé, la prise est beaucoup moins influencée par la nature de l'eau de gâchage. Toutes les différences de prise que l'on constate avec les ciments sont dues à l'aluminate de chaux (1); dans un ciment éventé, ce sel est déjà à peu près

(1) Voir annexe. — La prise du ciment Portland et ses anomalies.

complètement hydraté ; la prise est due alors uniquement à l'hydratation du silicate de chaux qui se produit toujours lentement, quelle que soit la composition de l'eau de gâchage.

Quand l'eau contient en dissolution du carbonate de soude ou de potasse, la dissolution de l'aluminate de chaux s'opère beaucoup plus vite que dans l'eau pure et la prise est accélérée.

Mais l'eau dont on se sert dans la pratique pour gâcher les mortiers provient toujours de sources, de puits, de rivières ou de citernes et elle contient une quantité de sels assez faible pour que la prise n'en soit pas influencée. La différence n'est très nette qu'avec l'eau de mer.

Temps écoulé depuis la fabrication. — Conservation du ciment. — Les ciments frais prennent généralement plus vite que lorsqu'ils sont restés quelque temps en sacs ou en magasin. Si le ciment reste en vrac, la prise du ciment n'est pas sensiblement modifiée, mais quand il est conservé en sacs, il suffit parfois de quelques jours pour que la prise soit retardée de plusieurs heures.

Certains ciments prennent lentement quand ils sont frais, puis après quelque temps de séjour en sacs ou en barils, la prise devient rapide. Nous avons donné l'explication de ce phénomène annexe I. (Influence du sulfate de chaux sur la prise et le durcissement du ciment Portland).

Les modifications qui s'opèrent dans un ciment conservé en magasin dépendent de la façon plus ou moins parfaite dont il est préservé de l'air et de l'humidité ; le ciment absorbe, en effet, très rapidement, l'eau et l'acide carbonique qui se trouvent dans l'atmosphère, et c'est cette absorption qui détermine les changements dans la prise ; elle est parfois utile quand le ciment contient un peu de chaux libre ou quand la prise est trop rapide; mais quand elle dépasse une certaine limite elle altère rapidement les qualités du ciment et peut même lui faire perdre une partie de son énergie.

Le ciment peut être considéré comme intact tant que la perte au feu (eau et acide carbonique) ne dépasse pas 5 %; au delà de cette limite, il commence à être éventé ; tous les ciments ne

paraissent pas être également sensibles à l'action de l'air et de l'humidité ; les ciments bien cuits sont altérés moins rapidement, les ciments fins semblent aussi se conserver beaucoup mieux que les ciments à mouture grossière.

Nous avons réuni dans le tableau n° 7 quelques résultats d'essais qui permettent de se rendre compte de l'influence du temps sur la prise et la densité.

Finesse du ciment. — Le ciment prend plus rapidement à mesure qu'il est moulu plus finement; ce fait se conçoit facilement puisque la proportion des parties actives augmente et les réactions chimiques qui se produisent pendant la prise sont facilitées par l'état de division de plus en plus grand de la matière. Cette accélération de la prise peut être assez considérable pour déterminer parfois, avec des ciments très fins et frais, une prise immédiate. Mais si le ciment est de bonne qualité et bien cuit, la prise ne tarde pas à devenir normale après quelques jours de magasinage. Avec certains ciments de qualité inférieure, cette prise rapide ne peut être atténuée parfois qu'après un temps très long.

Lorsque le ciment est gâché avec de l'eau de mer, la prise est beaucoup moins influencée par la finesse plus ou moins grande de la poudre.

La prise des ciments étant extrêmement variable, en raison des circonstances que nous venons d'énumérer, il est évident qu'elle ne peut donner une indication précise sur leur valeur réelle, c'est-à-dire sur leur cuisson plus ou moins parfaite et sur les soins apportés à leur fabrication.

Les ciments peu cuits, même lorsqu'ils sont frais, ne sont pas, en effet, ceux qui prennent toujours le plus rapidement et des ciments de fabrication très soignée présentent souvent une prise très rapide.

On doit demander à l'essai de la prise une simple indication au point de vue de l'emploi du ciment sur le chantier.

Lorsque le ciment gâché pur, en pâte ferme, prend en 15 à 20 minutes, on peut admettre ce temps de prise comme suffisant dans la plupart des cas ; quand on gâche le ciment en bouillie

claire avec 30 à 35 % d'eau, on peut exiger une durée de prise de 30 minutes au moins.

Les ciments à prise moyennement lente répondent à la grande majorité des cas, et, à moins de circonstances spéciales, ils conviennent mieux que les ciments à prise très lente.

4. Durcissement des mortiers de ciment. — On a exécuté de très nombreuses expériences sur la résistance des mortiers de ciment et des études très intéressantes ont été publiées sur cette question. On s'est occupé surtout des épreuves à la traction qui sont plus facile à faire et demandent des appareils peu coûteux; depuis quelques années cependant les essais à la compression se généralisent de plus en plus surtout à l'étranger.

On se servait autrefois, en France, pour les essais à la traction de briquettes de 16 centimètres carrés de section; en emploie maintenant la briquette de 5 centimètres carrés, qui a été adoptée partout. Nous n'insisterons pas sur les différences que l'on obtient en employant l'un ou l'autre genre de briquettes; on sait que la briquette de 16 centimètres carrés donne des résistances beaucoup plus faibles au centimètre carré que la briquette de 5 centimètres. (Voir sur cette question l'étude de M. Durand-Claye. *Annales des Ponts et Chaussées*, 1888, 2e trimestre, p. 179, et celle de M. Alexandre. *Annales des Ponts et Chaussées*, septembre 1890). Pour rompre la briquette de 5 centimètres carrés on se sert de l'appareil à leviers qui sera décrit page 211.

Pour les essais à l'écrasement, on emploie des éprouvettes cubiques présentant généralement une surface de 50 centimètres carrés; on utilise, pour rompre les éprouvettes, des presses hydrauliques, la machine à leviers de Schikert (voir page 215). ou la presse Amsler Laffon (page 216).

On a également adopté une nouvelle méthode qui consiste à écraser les briquettes qui viennent d'être rompues pour l'essai de traction.

En observant d'une manière générale la marche du durcissement des ciments gâchés purs ou mélangés avec du sable, on voit que les ciments peuvent se diviser en deux catégories. Les uns, après avoir donné pendant les premiers temps des résis-

tances assez faibles, finissent par atteindre une grande dureté après plusieurs mois ou même plusieurs années. Les autres présentent, au contraire, un accroissement très rapide de résistance et leur maximum est atteint en quelques semaines.

Presque tous les ciments de bonne qualité rentrent dans la deuxième catégorie (à moins qu'ils ne soient éventés), dans la première se trouvent les ciments de qualité inférieure.

Il est bien évident que, même en laissant de côté la question de qualité du ciment au point de vue des soins apportés à sa fabrication, il est préférable d'employer des ciments qui acquièrent en peu de temps une grande dureté. Il y a, en effet, toujours avantage à ce que le durcissement des mortiers ne soit pas trop lent, car les ouvrages sont placés en peu de temps à l'abri des causes de destruction. Dans les travaux à la mer, par exemple, un durcissement rapide est une condition essentielle. Les briquettes d'essais sont conservées dans des bacs, à l'abri de toute cause de détérioration et ces conditions permettent aux mortiers peu résistants dès le début d'atteindre leur maximum de dureté. Mais il n'en est pas ainsi dans les travaux où, par suite d'une foule de circonstances, le mortier peut être altéré profondément peu de temps après son emploi. Un mortier est d'autant plus sûr d'atteindre son maximum de dûreté que sa résistance initiale est plus considérable.

On croit généralement que les ciments qui durcissent lentement acquièrent une dureté finale supérieure à celle des ciments qui atteignent en peu de temps une grande résistance. C'est ce que M. Bonnami a formulé en disant: « ce que l'on gagne en résistance initiale, on le perd en résistance finale ». Il en est peut-être ainsi pour les chaux et les ciments prompts ou naturels qui contiennent des matières susceptibles de gonfler à la longue, mais ce n'est pas exact pour les ciments Portland. Avec ceux-ci, en effet, la résistance finale est toujours à peu près la même, que le durcissement soit rapide ou lent.

Le durcissement ne suit pas la même allure lorsque le ciment est gâché pur ou lorsqu'il est mélangé avec du sable. Dans le premier cas, le maximum de résistance est généralement atteint en quelques mois; dans le second cas, le durcissement est plus

lent et le maximum ne paraît être atteint qu'après plusieurs années.

Ciment gâché pur. — Le ciment gâché pur se comporte tout différemment quand il est immergé en eau douce ou en eau de mer.

Quand les éprouvettes sont conservées dans l'eau douce, les ciments qui atteignent le plus rapidement leur maximum de résistance sont ceux dont l'indice d'hydraulicité se rapproche le plus de la limite inférieure, ainsi que les ciments moulus finement. Quand le ciment est très fin, on observe quelquefois une diminution de résistance avec le temps, mais elle n'est jamais très importante. Les ciments riches en argile et ceux qui sont moulus grossièrement progressent plus lentement.

Les ciments composés de roches auxquelles on a mélangé des poussières de fours présentent au début des résistances d'autant plus faibles que la proportion de poussières est plus élevée ; mais ils continuent à durcir pendant très longtemps, et même avec des ciments composés presque en totalité de poussières, la résistance au bout de quelques années est comparable à celle des ciments de roches pures. (Tableaux nos 8,9,10,11).

Nous insistons tout particulièrement sur ce fait que la résistance du ciment pur immergé en eau douce ne diminue pas avec le temps, comme cela se produit à l'eau de mer, les chutes de de résistance que l'on peut constater dans tous nos essais n'excèdent jamais la limite des erreurs d'expérience.

Quand le mortier de ciment pur est conservé dans l'eau de mer, la résistance est plus grande qu'à l'eau douce pendant les premiers mois, puis, après avoir passé par un maximum qui se produit tantôt au bout de quelques semaines, tantôt après plus d'une année, elle décroit très sensiblement et souvent elle finit par devenir extrêmement faible. Les ciments riches en chaux, moulus finement, ou imparfaitement cuits, sont également ceux qui présentent en peu de temps un maximum de résistance élevé et qui décroissent ensuite le plus rapidement ; après avoir atteint parfois 60 et 70 kilogrammes par centimètre carré, au bout de quelques semaines, ces ciments ne donnent plus que 10 à

15 kilogrammes, et même moins parfois, après six mois ou un an.

Avec les ciments moulus grossièrement et ceux qui contiennent d'assez fortes proportions de poussières lourdes, on constate pendant plus longtemps des résistances ascendantes, mais la chute de résistance finit toujours par se produire (Tableaux nos 8, 9, 10, 11).

Cette allure du mortier de ciment pur à l'eau de mer a été signalée depuis longtemps et on a paru considérer ces diminutions de résistance comme un symptôme alarmant. Ce phénomène ne correspond pas cependant à une altération du ciment; les briquettes ne présentent, en effet, aucune trace de décomposition et l'analyse ne révèle rien d'anormal. On remarque seulement que la cassure n'est pas aussi nette qu'elle l'était quand le ciment donnait de fortes résistances ; l'intérieur de la briquette, au moment où on vient de la casser, paraît imprégné d'eau. En outre, le ciment est très fragile et il se brise en éclats, comme du verre, sous un choc assez faible. Aussi les charges qui déterminent la rupture sont-elles très variables quand le ciment commence à donner des résistances décroissantes ; on observe quelquefois des différences de 30 et 40 kilogrammes par centimètre carré pour une même série de briquettes.

Il est très probable que cette allure de la résistance du ciment pur provient d'un changement d'état moléculaire dû à une exagération de la cristallisation.

On peut vérifier, au moins pour un des sels qui existent dans le ciment hydraté, que les cristaux prennent, dans les mortiers immergés en eau de mer, un développement plus considérable que dans l'eau douce ; nous voulons parler de l'hydrate de chaux. Ce sel cristallise en prismes hexagonaux que l'on distingue à peine dans les briquettes immergées en eau douce, mais qui atteignent des dimensions beaucoup plus grandes dans les briquettes immergées en eau de mer ; dans ce cas, on observe parfois des cristaux d'hydrate de chaux ayant plus de deux à trois millimètres de longueur. On peut admettre que pour les autres sels, aluminate et silicate de chaux, le même phénomène doive se produire. Il arrive d'ailleurs très souvent que des bri-

quettes de ciment pur présentent des signes évidents de décomposition, bien que leur résistance reste très satisfaisante, comme nous le verrons plus loin. Les chutes de résistance ne peuvent donc être considérées comme un indice de l'altération du ciment.

D'après des expériences très nombreuses exécutées au port du Havre, par M. Quinette de Rochemond, inspecteur-général des ponts-et-chaussées, le ciment pur immergé en eau de mer, après avoir présenté l'allure que nous avons indiquée, arriverait de nouveau, quelques années plus tard, à donner des résistances croissantes. Les expériences de M. Quinette de Rochemond ont été poursuivies pendant plus de 20 années.

Pendant les premières semaines, la résistance à la traction du ciment immergé en eau de mer est presque toujours plus élevée que celle du ciment immergé en eau douce. Il n'en est pas ainsi à la compression, les éprouvettes conservées dans l'eau de mer ont toujours une résistance plus faible. On observe aussi dans les essais à la compression un maximum au bout de quelques mois pour les éprouvettes conservées dans l'eau salée ; la résistance diminue par la suite, mais jamais dans des proportions aussi importantes que pour les essais à la traction. (Voir tableau n° 10).

Quand le ciment, par suite d'une erreur de dosage, contient de la chaux libre, ce qui est le défaut le plus grave qu'il puisse avoir, les briquettes conservées dans l'eau douce ne présentent généralement pas de traces de décomposition et les résistances sont satisfaisantes à moins que l'excès de chaux ne soit par trop élevé. A l'eau de mer, même quand le ciment contient peu de chaux libre, les briquettes ne tardent pas à se fendiller ; elles gonflent et finissent par se désagréger complètement. Les altérations qui se produisent sur les éprouvettes doivent être attribuées uniquement à l'éffet de la chaux libre. (Le sulfate de chaux est aussi une cause de destruction, mais les ciments Portland en contiennent toujours assez peu pour qu'il n'y ait pas à se préoccuper du rôle de ce sel).

Si le ciment, sans contenir de chaux libre en quantité appréciable, possède un indice d'hydraulicité très voisin de la limite

inférieure, les briquettes immergées en eau de mer restent pendant très longtemps intactes, puis les bords commencent à s'effriter et les arêtes sont détruites au bout d'un certain temps. La totalité de la briquette peut finir par être ainsi désagrégée.

Le même effet se produirait si la chaux libre en excès était hydratée avant l'emploi du ciment. Des briquettes faites avec un ciment frais contenant 68.80 % de chaux et dont l'indice d'hydraulicité était de 0, 38 ont été rapidement détruites ; on a laissé le ciment en poudre exposé à l'air pendant huit jours, puis on a confectionné de nouveau des briquettes qui ont été immergées en eau de mer ; on a obtenu les résistances suivantes :

	7 jours,	28 jours,	3 mois,	6 mois,	9 mois,	1 an,	18 mois,
Résistance par c. c.	42kg,2	55kg,0	48kg,5	52kg,0	46kg,9	35kg,0	25kg,0

Au bout de 18 mois les briquettes étaient en partie décomposées mais elles n'avaient pas gonflé.

Avec un autre ciment, de composition normale, mais auquel on avait ajouté 10 % de chaux hydratée, on a répété la même expérience et on a constaté les résistances suivantes :

7 jours,	28 jours,	3 mois,	1 an,	2 ans,	3 ans,
35kg,5	43kg,2	49kg,8	47kg,2	63kg,5	63kg,5

Au bout de deux ans, les briquettes commençaient à être attaquées mais les arêtes seules se décomposaient ; on voit que cette altération du ciment n'a influé en rien sur la résistance.

Mélanges de ciment et de sable. — La résistance des mélanges de ciment et de sable est d'autant moindre que la quantité de sable est plus considérable. Le mélange en parties égales de sable et de ciment atteint à peu près la même dureté que le ciment pur ; avec des sables de bonne qualité, on obtient même alors des résistances supérieures à celles du ciment gâché en pâte pure.

Le durcissement des mortiers présente une allure plus régulière que le ciment pur, la résistance progresse pendant plusieurs années et on n'observe pas de diminution bien marquée, même pour les mortiers immergés en eau de mer, comme le fait voir l'expérience suivante :

Composition du mortier Ciment, sable, en poids	Quantité d'eau de gâchage pour 100 grammes de mortier	Résistance par centimètre carré à la traction													
		Briquettes conservées dans l'eau douce							Briquettes conservées dans l'eau de mer						
		7 jours	28 jours	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	7 jours	28 jours	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans
	cc.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
1 : 0	26	32,7	50,0	50,4	51,0	52,3	48,9	51,6	34,4	49,9	56,4	14,0	15,0	9,1	6,4
1 : 1	12	36,7	49,1	50,0	55,1	58,0	63,4	58,6	36,4	45,9	43,7	43,5	36,5	54,9	54,7
1 : 2	10,5	33,7	38,7	45,4	48,1	46,4	53,9	55,1	31,1	38,7	39,1	38,2	36,4	46,1	49,6
1 : 3	10,5	15,7	28,7	31,7	33,2	35,9	36,4	38,5	18,1	20,5	26,2	26,9	26,7	36,6	37,5
1 : 5	10,0	7,5	12,4	15,0	16,2	18,2	18,2	20,0	7,6	8,4	13,2	13,5	14,6	17,5	21,6

On admet généralement que la résistance à la compression est 10 fois plus grande que la résistance à la traction ; c'est à peu près exact pendant les premiers mois, mais au bout d'une année le rapport n'est plus le même, la résistance à la compression peut être alors 12 à 13 fois plus grande que celle à la traction. Le rapport est également plus élevé avec les mortiers riches qu'avec les mortiers maigres ; ainsi tandis qu'aves les mortiers 1 : 1, 1 : 2 et 1 : 3 il est de 10 à 12, il descend à 8 pour le mortier 1 : 5 et à 5 pour le mortier 1 : 10.

Si l'on compare les résistances des mortiers immergés en eau douce et en eau de mer, on remarque que la marche du durcissement suit une loi très différente de celle du ciment gâché en pâte pure.

Généralement la résistance des mortiers immergés en eau de mer est tout d'abord aussi grande et très souvent plus élevée que celle des mortiers conservés dans l'eau douce (7 jours et quelquefois 28 jours). Mais la résistance des mortiers à l'eau douce augmente rapidement et dépasse bientôt celle des mortiers à l'eau de mer ; après une année environ l'accroissement ne se produit plus que lentement ; les mortiers à l'eau de mer, qui étaient restés à peu près stationnaires pendant une période qui peut s'étendre de 3 mois à 3 ans présentent ensuite une allure franchement ascendante et arrivent à égaler et souvent même à dépasser les mortiers à l'eau douce.

C'est avec les ciments riches en chaux et moulus finement que l'on observe la plus grande différence entre les mortiers immergés en eau douce et en eau de mer. Quand les ciments contiennent des proportions assez faibles de poussières lourdes, la différence est déjà moindre et tend à s'annuler rapidement. Avec les ciments de grosse mouture et ceux qui contiennent de grandes quantités de poussières lourdes, l'allure de la résistance est la même à l'eau douce et à l'eau de mer ; cependant les mortiers conservés dans l'eau de mer sont souvent plus résistants et au bout de quelques années leur supériorité est très marquée (Tableaux n°s 8, 9, 10, 11).

Quand les chaux et les ciments contiennent de la chaux libre, la résistance des mortiers est presque toujours plus élevée dans l'eau de mer que dans l'eau douce pendant les premiers mois. En voici quelques exemples :

Désignation de l'agglomérant	Résistance par centimètre carré à la traction — Ciment pur				Mortier 1 : 3				Observations
	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	
	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	
Ciment de grappiers	3,9	6,3	11,2	16,7	1,5	2,5	4,9	7,5	Briquettes à l'eau mer décomposées complètement au bout de 8 mois.
	4,0	**7,8**	**11,5**	**0**	**3,6**	**7,5**	**13,4**	**13,2**	
Ciment à prise rapide	9,7	11,9	11,0	10,7	11,4	15,6	20,0	19,4	Pas de décomposition, mais les briquettes ne tenaient pas à l'eau chaude
	20,7	**26,4**	**20,0**	**15,4**	**19,9**	**30,5**	**33,4**	**31,4**	
Ciment à prise rapide	12,5	14,0	18,1	19,2	6,0	9,1	15,4	18,1	Pas de décomposition, mais les briquettes ne tenaient pas à l'eau chaude.
	14,9	**23,6**	**26,7**	**24,5**	**8,2**	**18,7**	**29,9**	**33,9**	
Ciment mixte	24,7	24,0	33,7	43,0	5,5	8,2	12,1	19,9	Ciment ne tenant pas à l'eau chaude. Briquettes à l'eau de mer profondément fendillées au bout d'une année
	29,9	**49,7**	**48,4**	**34,0**	**9,9**	**17,9**	**26,4**	**22,1**	
Chaux hydraulique	3,0	5,3	9,2	15,9	4,5	8,0	15,7	18,4	Briquettes de chaux pure à l'eau de mer décomposées en quelques jours.
	»	»	»	»	**4,5**	**18,4**	**21,6**	**25,6**	
Ciment Portland	20,1	25,9	34,0	40,7	12,1	19,9	32,9	36,2	Ciment mal dosé ; ne tenant pas à l'eau chaude. Briquettes de ciment pur à l'eau de mer fendillées.
	9,5	**20,2**	**29,5**	**41,0**	**12,9**	**20,6**	**30,0**	**31,0**	

Nota. — Les résistances des briquettes immergées en eau de mer sont inscrites en caractères gras.

La nature de l'eau dans laquelle le mortier est conservé a plus

d'influence que l'eau de gâchage elle-même. Ainsi des briquettes de mortier gâché à l'eau douce et immergées dans l'eau de mer présentent la même allure que si le mortier avait été gâché à l'eau de mer et *vice versa*.

Quand le mortier est conservé à l'air, la nature de l'eau de gâchage a une importance beaucoup plus grande ; avec l'eau de mer, on obtient des résistances plus élevées aussi bien à la traction qu'à la compression. (Tableaux n°s 10, 11). Nous ferons voir (annexe 1) que les solutions faibles de chlorure de calcium produisent le même effet.

La quantité d'eau que l'on emploie pour gâcher le ciment pur ou les mélanges de ciment et de sable a une influence très importante sur la résistance, surtout pendant les premiers mois.

L'excès d'eau diminue toujours la résistance du ciment gâché pur ; mais en employant une quantité d'eau très faible, on n'obtient pas toujours une résistance plus élevée parce que la manipulation est plus difficile, la pâte moins homogène et que la prise se produit parfois ou commence pendant le gâchage. Mais si la pâte est bien travaillée, et si la prise est assez lente, la résistance est plus grande, au moins dès le début, en employant le minimum d'eau. Par la suite, les différences de résistance tendent à s'annuler ; le ciments gâchés avec excès d'eau présentent une allure plus régulière ; quand le ciment est gâché avec très peu d'eau, il atteint en peu de temps une résistance élevée, puis il reste stationnaire ou il présente une légère décroissance (Tableau 12).

Pour gâcher le ciment en pâte ferme, on emploie de 23 à 30 % d'eau, c'est-à-dire 23 à 30 centimètres cubes d'eau pour 100 grammes de ciment. La finesse de mouture peut faire varier sensiblement la quantité d'eau de gâchage ; plus la poudre est fine et plus il faut employer d'eau. Les ciments de qualité inférieure et ceux qui proviennent de roches imparfaitement cuites demandent plus d'eau, à finesse égale, que les ciments bien cuits.

Les ciments à prise rapide se gâchent généralement avec une plus grande quantité d'eau que les ciments à prise lente ; cependant pour les ciments éventés, qui ont une prise très lente, il faut plus d'eau que pour les ciments frais (Tableau n° 7).

Enfin, quand on se sert d'eau de mer, le volume de l'eau nécessaire pour le gâchage est un peu moindre que si l'on emploie de l'eau douce.

Le dosage de l'eau a une importance encore plus grande lorsque le ciment est mélangé avec du sable. Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre dans lequel nous traiterons spécialement des mortiers.

Température. — La prise des ciments et leur durcissement étant dus à des phénomènes d'ordre chimique, il est facile de prévoir que la température de l'eau de gâchage doit jouer un rôle très important. Son influence se manifeste surtout pendant la première période du durcissement.

Les ciments gâchés avec de l'eau très froide présentent de faibles résistances pendant les premiers jours, tandis que dans l'eau chaude ils atteignent en peu de temps une grande dureté ; mais par la suite la résistance des premiers augmente et dépasse souvent celle des seconds ; ceux-ci atteignent rapidement un maximum, puis la résistance diminue ou reste stationnaire. Au bout d'un certain temps, les résistances tendent à s'égaliser (Tableau n° 13).

En pratique, les différences de température n'ont pas une très grande importance ; il suffit de prendre des précautions pour éviter que le mortier se trouve exposé à une température trop élevée ou moment du gâchage et pendant la prise, ou de se mettre en garde contre la lenteur de prise par un temps froid.

Finesse de mouture. — La finesse de mouture, qui était regardée autrefois comme une question secondaire, est devenue depuis quelques années, et avec raison, une des qualités essentielles des ciments à prise lente. On s'est contenté pendant très longtemps de contrôler la qualité des ciments par des essais sur le ciment gâché pur ; nous verrons plus loin que, dans ce cas, la finesse de mouture a peu d'influence ; l'attention n'étant pas attirée sur ce point on ne s'en préoccupait pas.

Mais, en essayant la résistance des mélanges de ciment et de

sable, on a bientôt reconnu combien l'énergie du ciment augmentait à mesure qu'il était moulu plus finement. Comme les ciments sont toujours employés avec addition de sable, on s'est alors efforcé de réduire en poudre fine tous les grains qui restaient autrefois inertes et sans valeur. Si la dépense nécessitée par la mouture est plus élevée qu'autrefois, on est du moins assuré de ne pas livrer au consommateur 20 à 30 $^{0}/_{0}$ de matière inerte. Si l'on considère qu'il fallait payer des frais de transport souvent considérables en pure perte et que, pour borner l'économie à sa plus simple expression, on peut remplacer sur le chantier cette même quantité de ciment sans valeur par du sable, on reconnaîtra que l'amélioration de la mouture constitue un progrès très important dans la fabrication des ciments.

Le durcissement du ciment gâché pur, avons-nous dit, est peu influencé par la finesse de mouture. Les ciments fins durcissent un peu plus rapidement, mais ils paraissent atteindre un maximum un peu moins élevé que les ciments moulus grossièrement. Quand le ciment est moulu très finement et qu'il est gâché à l'eau douce, la résistance est souvent plus faible ; mais cela tient, soit à une prise trop rapide, soit à la quantité d'eau qui doit être beaucoup plus grande qu'avec les ciments grossièrement moulus. Si on emploie de l'eau de mer pour le gâchage, les ciments fins et de bonne qualité donnent toujours de grandes résistances, mais le maximum est rapidement atteint et il se produit ensuite une décroissance très prononcée. Le durcissement des ciments grossièrement moulus est plus régulier et le maximum est plus élevé qu'avec les ciments fins (Tableaux n°s 11 et 14).

On ne peut donc pas se contenter des essais faits sur le ciment pur pour apprécier la valeur d'un ciment, puisqu'une de ses principales qualités n'est pas mise ainsi en lumière.

Il suffit de faire quelques essais sur des mortiers confectionnés avec des ciments de plus en plus fins pour se convaincre immédiatement du rôle considérable de la finesse sur la résistance. Les essais du tableau n° 14 ont été faits avec des ciments de diverses provenances ; les résultats sont assez frappants par eux-mêmes pour que nous n'ayons pas besoin de les discuter.

On pourrait croire que les mortiers de ciments fins atteignent rapidement leur maximum de résistance et qu'ils restent ensuite stationnaires, tandis qu'avec les ciments de grosse mouture, les mortiers, peu résistants au début, augmentent lentement et présentent finalement une résistance égale aux premiers. Les ciments extrêmement fins, mélangés avec du sable, durcissent en effet très rapidement et restent ensuite stationnaires ; mais avec des ciments de finesse moyenne, on remarque une progression plus marquée qu'avec les ciments grossièrement moulus.

Il ne faudrait pas cependant s'exagérer l'importance de la finesse de mouture et il est inutile de la pousser trop loin. Quand la quantité de sable mélangée avec le ciment est assez faible et que les vides entre les grains de sable sont remplis et au-delà de pâte de ciment, la finesse très grande de la poudre ne présente pas un grand avantage. On se trouve alors dans le cas du ciment gâché pur pour lequel la mouture plus ou moins fine n'a pas d'influence. Les grains de ciment qui n'ont pas été réduits en poudre et dont le volume est appréciable ne peuvent pas évidemment s'agglomérer s'ils ne se trouvent en contact que par quelques points ; mais lorsqu'ils sont entourés de ciment fin, ils agissent par toute leur surface et la liaison de toute la masse est complète. De même les grains très fins peuvent être attaqués par l'eau jusqu'au centre, tandis que les grains plus volumineux ne le sont qu'à la surface. L'expérience suivante permettra de s'en rendre compte.

Des grains ayant traversé le tamis de 900 mailles, et retenus par le tamis de 4900 mailles, ont été placés dans un verre rempli d'eau ; au bout d'une année la masse était très dure et aussi résistante que du ciment fin ; des grains refusés par le tamis de 900 mailles, et ayant traversé le tamis de 324 mailles, placés dans les mêmes conditions, ne formaient qu'une masse agglomérée mais ne présentant pas de résistance ; enfin les grains qui étaient restés sur le tamis de 324 mailles, après le même temps de séjour dans l'eau, n'étaient même pas agglomérés.

En déterminant la quantité d'eau combinée pour chacun de ces échantillons, on a trouvé que le premier en contenait 10,26 °/₀, le second 7,54 et le troisième 6,30. Un ciment fin, gâché en

pâte pure, contient au bout d'une année 10 à 11 % d'eau combinée. Les grains suffisamment fins pour traverser le tamis de 900 mailles paraissent donc s'attaquer complétement.

Dans un mortier maigre, contenant une dose de ciment insuffisante pour que les vides soient remplis, il est évident que les grains de ciment assez volumineux jouent le rôle de sable et appauvrissent le mortier.

Toutefois, si l'on considère uniquement les résultats donnés par les essais de résistance, l'avantage de la finesse de mouture ne paraît bien évidente que pour les mortiers immergés en eau douce et pendant les premiers mois seulement. Quand les mortiers sont immergés en eau de mer, les ciments grossièrement moulus donnent des résultats peu différents de ceux que l'on obtient avec les ciments fins, du moins dans les essais à la traction (Tableaux n°s 11-14).

A l'air, les ciments fins ne paraissent pas non plus donner des résultats beaucoup plus élevés que les ciments grossièrement moulus; le contraire se produit même quelquefois (Tableau n° 18). Dans les essais à la traction, les mortiers faits avec des ciments fins paraissent notablement plus résistants dans l'eau douce que dans l'eau de mer pendant les premières années, par la suite, les résistances tendent à s'égaliser; avec les ciments grossièrement moulus, nous avons fait remarquer au contraire que les mortiers présentent des résistances presque toujours plus grandes dans l'eau de mer que dans l'eau douce (Voir tableau n° 14, essai n° 3). A l'écrasement, on ne constate pas la même loi. Les mortiers conservés dans l'eau de mer restent toujours inférieurs à ceux qui sont conservés dans l'eau douce, et les ciments grossièrement moulus donnent des résultats beaucoup plus faibles que les ciments fins (Tableaux n°s 9-11-14). Il est possible d'ailleurs qu'après un certain nombre d'années les ciments de grosse mouture puissent reprendre l'avantage.

Quoi qu'il en soit, la mouture fine ne présenterait pas un avantage suffisant pour compenser les frais qu'elle occasionne si l'on tenait compte uniquement du degré de dureté que le mortier est susceptible d'acquérir; des ouvrages très impor-

tants faits avec des ciments de mouture grossière prouvent d'ailleurs surabondamment que la résistance de pareils ciments est bien suffisante.

Un ciment fin est cependant préférable quand le dosage en ciment est peu élevé, pour les mortiers à 200-300 kilogrammes par mètre cube de sable, par exemple; car alors, non seulement la résistance est plus grande dès les premiers jours, mais le mortier est plus liant, plus compact et par conséquent plus facile à employer. On reproche souvent au mortier de ciment d'être trop maigre, quand le dosage est faible en ciment; dans ce cas, en effet, si la poudre est grossière, le mortier se délave très facilement au moindre excès d'eau et il est difficile à employer. Avec un ciment fin, cet inconvénient est beaucoup moindre. On n'hésite plus maintenant à exécuter des ouvrages considérables avec des mortiers de ciment à 300 kilogrammes et même 200 kilogrammes par mètre cube de sable. Ce résultat est dû certainement en grande partie à l'emploi des ciments fins.

Quand le mortier est riche en ciment, l'inconvénient que nous venons de signaler pour les ciments de grosse mouture n'existe plus, et comme la résistance elle-même est peu influencée par la mouture plus ou moins fine de la poudre, il est inutile dans ce cas de rechercher une grande finesse.

Mais il est bien évident que l'on ne peut pas fabriquer du ciment destiné spécialement à certaines catégories de travaux; on pourrait le faire quand il s'agit d'alimenter de grands chantiers, mais pour la consommation générale, on ne peut y songer. On doit donc se tenir dans une moyenne qui donne satisfaction quand il s'agit de confectionner des mortiers maigres, et qui ne grève pas la fabrication de frais exagérés et inutiles. Les ciments de bonne qualité sont moulus actuellement de manière à ce que le résidu sur le tamis de 324 mailles soit nul; sur le tamis de 900 mailles il en reste 3 à 6 % et sur celui de 4 900 mailles, 20 à 30 %. Il paraît inutile actuellement de pousser plus loin la finesse de mouture.

La mouture fine est toujours préférable quand il s'agit de ciment de qualité inférieure; sans parler des incuits que ces ciments peuvent contenir et qui, s'ils conservaient un volume

appréciable, pourraient donner lieu à des phénomènes de gonflement, ces ciments renferment presque toujours une quantité de poussières lourdes qui peut atteindre 60 et même 80 %. Dans ce cas, les roches qui se trouvent mélangées avec les poussières, et qui sont très difficiles à moudre, resteraient presque en totalité à l'état de déchet si on se contentait d'une mouture grossière. En recherchant une mouture très fine, ces parties, qui seraient restées à peu près inertes, deviennent alors les plus actives et la qualité du ciment est beaucoup augmentée.

Nature du sable. — Si la dureté du mortier dépend en grande partie de la qualité du ciment, la nature du sable a aussi à cet égard une très grande importance. En général, les sables fins donnent de moins bons résultats que les gros sables ; nous reviendrons sur ce sujet au chapitre V. Toutefois les différences, très sensibles dès le début, paraissent souvent s'atténuer avec le temps, en ce qui concerne la résistance à la traction (Tableau n° 15).

Quand les mortiers sont conservés à l'air, l'influence de la nature du sable paraît être moins importante que pour les mortiers immergés.

Essayés à la traction, les mortiers faits avec des sables naturels, d'une aussi bonne qualité qu'ils puissent être, présentent des résistances très sensiblement inférieures à celles que l'on obtient avec le sable artificiel (sable normal) ; mais à la compression, les sables naturels de bonne qualité donnent souvent des résultats plus satisfaisants que le sable artificiel, pourvu que la grosseur des grains soit sensiblement la même.

Avec les sables fins ou ceux qui contiennent du calcaire tendre, des débris de coquillages, etc., les résistances sont notablement inférieures à celles que l'on obtient avec les sables moyens ou gros et composés de grains durs ; la différence est bien plus marquée dans les essais à la compression que dans les essais à la traction (Tableau n° 15).

Le sable employé dans la confection d'un mortier a naturellement d'autant plus d'influence sur le durcissement que le dosage est moins riche en ciment. Quand le mortier est comprimé

fortement, la nature du sable a également moins d'importance que si le mortier est gâché à la consistance ordinaire.

Temps écoulé depuis la fabrication. — On a longtemps attaché une grande importance à ce que le ciment ne soit employé qu'après un séjour de plusieurs mois en magasin. Cette précaution était en effet utile lorsque le dosage exact n'était pas encore parfaitement déterminé et lorsqu'on n'apportait pas à la préparation des matières premières et à la cuisson autant de soins qu'aujourd'hui ; mais elle était bien insuffisante, car on ne peut jamais être certain d'atténuer par un séjour en magasin, aussi prolongé qu'il soit, l'effet de la chaux libre.

Actuellement, la régularité de dosage que présentent les ciments de bonne qualité permet de les employer sans inconvénient quelques jours après qu'ils ont été fabriqués.

Quand un ciment est conservé en magasin et en vrac, il subit très peu le contact de l'air et il peut rester ainsi des mois et même des années sans éprouver aucun changement ; enfermé dans des barils, il peut se conserver aussi pendant longtemps sans altérations ; en sacs il subit plus facilement l'influence de l'air et il absorbe peu à peu une certaine quantité d'eau et d'acide carbonique. On dit que le ciment est éventé quand cette absorption est assez grande pour qu'il se produise un commencement d'agglomération de la poudre. Si le ciment éventé peut encore se réduire facilement en poudre fine, il présente pendant les premiers mois, et lorsqu'il est gâché pur, une résistance plus faible que le ciment frais, mais à la longue il atteint une aussi grande dureté. Quand le ciment est mélangé avec du sable, la différence est moins sensible encore ; on n'observe une diminution bien nette de résistance, dans les premiers mois seulement, que si le ciment est profondément altéré par l'humidité (Tableau n° 16).

Quand on ne tient pas à une grande dureté en peu de temps et que la prise très lente n'a pas d'inconvénient, il n'y a donc aucunement à craindre d'employer du ciment éventé, à condition, bien entendu, que les morceaux agglomérés puissent se réduire en poudre assez facilement et qu'on ait soin de les

écraser complètement avant de mélanger le ciment avec le sable (1).

Milieu dans lequel se trouve placé le mortier après l'emploi. — Les mortiers de ciment ne prennent pas la même dureté quand ils sont conservés sous l'eau où quand ils restent à l'air ; dans le premier cas, la résistance est plus élevée pendant les premiers jours, mais les mortiers à l'air ne tardent pas à devenir plus résistants ; les résultats des tableaux nos 11 et 17 feront voir que les mortiers de ciment Portland conservés à l'air acquièrent une résistance extrêmement élevée.

Ce sont les mortiers gâchés avec de l'eau de mer qui durcissent le mieux quand ils sont exposés à l'air.

La résistance devient beaucoup plus grande quand le mortier est resté les premiers jours dans l'eau ou à l'humidité avant d'être exposé à l'air. Des briquettes de mortiers 1 : 3 conservées à l'air, sans avoir été immergées au début, ont donné les résultats suivants :

7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans
13 kg. 1	15 kg. 6	18 kg. 6	26 kg. 5	28 kg. 1	27 kg. 2

Avec le même mortier on a fait des briquettes qui, 24 heures après leur confection, ont été immergées pendant 48 heures, puis on les a retirées de l'eau et elles sont restées à l'air ; on a obtenu les résistances suivantes :

7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans
14 kg. 7	23 kg. 1	35 kg. 2	36 kg. 4	47 kg. 7	56 kg. 9

Ces deux séries de mortiers étaient faites avec du sable ordinaire de qualité assez médiocre ; dans une autre série, le sable employé étant du quartz concassé et tamisé, les briquettes cons-

(1) Voir sur ce sujet les expériences de M. Féret (*Annales des Ponts et Chaussées*, mars 1890). Nous ferons observer toutefois que ces expériences ont été exécutées au point de vue spécial de travaux à la mer. Dans ce cas, l'éventement modéré du ciment peut en effet être utile, même avec des ciments bien dosés. Nous avons fait remarquer que les ciments dont l'indice d'hydraulicité se rapproche de la limite inférieure, bien que présentant une invariabilité de volume absolue dans l'eau douce, peuvent donner à la longue des résultats défectueux dans l'eau de mer.

tamment à l'air ont donné :

7 jours	28 jours	3 mois	1 an	2 ans
11 kg. 6	15 kg. 7	22 kg. 5	29 kg. 7	39 kg. 5

et les briquettes qui étaient restées deux jours dans l'eau avant d'être exposées à l'air :

7 jours	28 jours	2 mois	1 an	2 ans
12 kg. 9	26 kg. 0	36 kg. 5	50 kg. 2	51 kg. 7

L'expérience de chaque jour indique bien d'ailleurs que les mortiers exposés à l'air deviennent bien plus durs quand ils ont été maintenus humides pendant les premiers temps du durcissement. Ainsi, les enduits faits en plein été sont moins résistants que ceux confectionnés en hiver; les dallages sur lesquels on a pris soin de maintenir une couche de sable humide pendant quelques jours, durcissent beaucoup mieux que si on les a laissés à l'air libre après leur confection.

Pour que la résistance à l'air devienne très grande, il n'est pas nécessaire que l'on maintienne le mortier humide pendant longtemps ; le résultat paraît être le même si on laisse le mortier un ou deux jours dans l'eau ou plusieurs semaines. Voici à ce sujet quelques expériences exécutées par M. Dyckerhoff :

Numéros d'ordre des essais	Composition du mortier	Mode de conservation des éprouvettes	Résistance à la traction par centimètre carré après				
			1 semaine	4 semaines	13 semaines	26 semaines	1 an
			kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
1	1 de ciment 3 de sable	Dans l'eau	17,5	21,0	22,7	28,2	32,9
2	—	A l'air (dans une chambre)	17,9	22,7	26,1	32,4	35,6
3	—	1 jour à l'eau puis à l'air . . id.	18,7	25,4	29,3	34,1	38,4
4	—	2 jours dans l'eau puis à l'air . id.	19,3	26,9	31,5	38,1	40,1
5	—	4 jours dans l'eau puis à l'air . id.	18,0	28,9	33,4	38,7	41,3
6	—	1 semaine dans l'eau puis à l'air. id.	17,4	28,2	34,9	39,4	41,9
7	—	2 semaines dans l'eau puis à l'air. id.	»	26.5	35,2	40,0	42,2
8	—	4 semaines dans l'eau puis à l'air. id.	»	21,3	34,9	41,2	42,9
9	—	A l'air libre . . . . id.	16,1	27,6	25,5	35,4	53,5
10	—	1 semaine dans l'eau puis à l'air libre.	17,6	22,1	30,3	33,9	51,1
11	1 de ciment 6 sable 1/2 chaux hydratée	A l'air libre	8,0	13,5	22,9	24,1	35,1
12	—	1 semaine dans l'eau puis à l'air libre.	»	12,6	23,3	24,2	40,2
13	—	Dans l'eau	8,0	12,0	16,6	20,1	23,8

Essais de résistance à la traction et à la compression exécutés sur des ciments de diverses provenances. — Nous avons réuni dans le tableau n° 11 une série d'essais exécutés sur 84 échantillons de ciments de diverses provenances. Les essais ont été faits sur le ciment pur et sur le mortier 1 : 3 ; une partie des briquettes à été conservée dans l'eau douce, une autre partie dans l'eau de mer ; avec quelques-uns des échantillons on a confectionné des briquettes de ciment pur et de mortier qui ont été conservées à l'air.

On a divisé les échantillons en ciments de roches choisies, ciments de fabrication courante à mouture fine et à grosse mouture, et en ciments de deuxième qualité.

Dans un premier groupe on a réuni les essais dans lesquels on s'est servi de sable naturel pour la confection des mortiers. Pour quelques-uns des échantillons de ce groupe nous avons des résistances de 6 ans, mais nous ne les avons pas indiquées parce qu'elles sont encore en trop petit nombre ; jusqu'à présent elles ne modifient en rien les conclusions que l'on peut tirer des résistances à 5 ans.

Les mortiers des échantillons du deuxième groupe ont été confectionnés avec le sable normal artificiel (quartz concassé).

Pour les essais à la compression, on a employé du sable normal ; mais les premiers échantillons les mortiers n'ont pas été comprimés fortement et la densité des éprouvettes était un peu faible. Par la suite les mortiers ont été mieux comprimés et on a obtenu des résistances plus élevées (1).

(1) L'influence du tassement que l'on fait subir au mortier est bien mise en évidence par les expériences suivantes, Tableau p. 137 :

En Allemagne, en Suisse, en Autriche, les éprouvettes confectionnées à la main sont très fortement comprimées, les cubes sont remplis en trois ou quatre fois ; on se sert aussi de machines pour comprimer le mortier dans les moules. Dans tous les cas la densité des éprouvettes dépasse généralement 2,20. On n'emploie pas de sable artificiel, mais du sable quartzeux naturel de très bonne qualité. En Allemagne, le sable employé à la station d'essais de Charlottenbourg provient de Stettin. Ce sable donne à la compression, des résultats plus élevés que le sable artificiel ; il pèse, au litre non tassé, environ 1 500 grammes, tandis que le sable artificiel ne pèse que 1 300 grammes. En France, on emploie maintenant du sable de la plage de Leucate Aude).

Il est très important, dans les essais de résistance, d'indiquer la densité des éprou-

Les échantillons du tableau 11, avec lesquels on a fait des essais à la compression, étaient en général des ciments fins de fabrication courante.

Pour les mortiers qui ont été conservés à l'air, on a employé du sable ordinaire tamisé ; les briquettes sont restées constamment à l'air.

5. Adhérence du mortier aux pierres. — L'adhérence d'un mortier aux matériaux qu'il est destiné à relier est une de ses qualités les plus importantes. Le mortier de ciment Portland possède une grande force d'adhérence ; on peut s'en rendre compte en essayant de détacher deux pierres ou deux briques soudées avec du ciment. Il est difficile de mesurer avec précision la force d'adhérence d'un mortier à une pierre ou à une autre matière. La quantité d'eau de gâchage du mortier et la nature du sable jouent à cet égard un rôle très important,

Désignation du ciment	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré à la compression Mortier 1 : 3							Observations
			7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	
Ciment nº 1			kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	
Poids du litre : 1280 . .	11	2,04	80,0	111,7	150,0	176,7	216,7	230,0	260,0	(1)
Résidu : tamis de 900 = 1,5	11	2,11	86,7	128,3	166,7	206,7	270,0	260,0	290,0	(2)
— — 5000 = 26.	11	2,08	85,0	135,0	166,7	196,7	253,3	260,0	306,7	(3)
Ciment nº 2										
Poids du litre : 1230 . .	10,5	»	120,0	200,0	245,0	»	263,3	»	»	(1)
Résidu : tamis de 900 = 1,5	10,5	»	158,7	222,3	295,0	»	»	»	»	(2)
— — 5000 = 26.	10,0	»	184,0	243,3	280,0	»	303,3	»	»	(3)

(1) Mortiers comprimés en remplissant le moule d'une seule fois.
(2) — — en deux fois.
(3) — — en trois fois.

vettes. On ne peut comparer des résultats entre eux qu'à la condition de savoir de quelle manière on a fait les essais. Il est indispensable de donner toutes les indications concernant la densité des éprouvettes, la quantité d'eau de gâchage, la nature du sable, etc.

ainsi que l'état de la surface du corps sur lequel on place le mortier.

Aussi n'est-il pas étonnant que les chiffres donnés par divers auteurs pour le coefficient d'adhérence du mortier de ciment aux matériaux soit très divers. MM. Coignet et de Tédesco admettent le chiffre de 25 kilogrammes par centimètre carré. M. Bauschinger avait trouvé que la force d'adhérence du ciment au fer était de 40 kilogrammes par centimètre carré.

Les expériences sur l'adhérence sont encore peu nombreuses ; nous en avons fait quelques-unes en nous servant de blocs de marbre sur lesquels on plaçait et on laissait durcir le mortier à essayer ; à l'aide de dispositions spéciales, on pouvait arracher le mortier avec la machine ordinaire pour les essais de traction ; voici les principaux résultats obtenus :

On n'a essayé que des mortiers au dosage de 1 : 3 ; avec le ciment pur, l'adhérence était tellement grande, que les blocs de marbre se rompaient avant que le décollement ait pu se produire.

Nous avons expérimenté des mortiers comprimés fortement, comme on le fait pour les briquettes d'essais à la traction, et d'autres mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier, c'est-à-dire avec excès d'eau. Les premiers donnent des résultats assez réguliers ; la force d'adhérence paraît être à peu près le tiers de la résistance à la traction ; pour les seconds, on remarque que l'excès d'eau de gâchage ne diminue pas beaucoup la force d'adhérence et que dans certains cas, avec les sables fins notamment, elle procure au contraire une augmentation de résistance. Il doit, en effet, en être ainsi parce que l'eau de gâchage tend à entraîner le ciment hors du mortier et à le déposer précisément sur la surface du corps avec lequel le mortier doit se relier. Aussi la résistance à la traction d'un pareil mortier est-elle moins grande que la force d'adhérence. Quand on a voulu essayer à 7 jours les pièces faites avec le mortier gâché mou, celui-ci s'est rompu avant que l'on ait pu obtenir le décollement du mortier.

Désignation des mortiers		Quantité d'eau de gâchage (pour 100 gr. de mélange)	Charge par centimètre carré ayant déterminé la rupture après 7 jours	Charge par centimètre carré ayant déterminé la rupture après 28 jours
			kg.	kg.
Mortiers comprimés	Mortiers faits avec du sable normal.	10	3,10	7,08
		10	3,70	7,80
		10	»	7,73
	Mortiers faits avec du sable fin des dunes	11	»	3,10
		11	»	4,30
Mortiers non comprimés	Mortiers faits avec du sable normal	14	»	8,33
		14	»	5,20
		14	»	5,47
	Mortiers faits avec du sable normal	18	»	5,50
		18	»	5,30
Mortiers comprimés (sable normal)	Ciment de laitier . .	10	3,22	4,16
	Ciment de Vassy . .	10	»	4,06

Les mortiers faits avec du sable fin et gâchés avec peu d'eau ont une force d'adhérence beaucoup plus faible que celle des mortiers confectionnés avec du sable de grosseur moyenne.

Pour comparaison, nous avons indiqué les résultats obtenus avec du ciment de laitier et du ciment de Vassy.

		A				B		C		D	
Dosage du mortier		1:3	1:3	1:2	1:2	1:3	1:2	1:3	1:2	1:3	1:2
Quantité d'eau.		12	13,8	9,5	15	12	13	15	17	12	13
Résistance par cm²		kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
7 jours. . .		7,5	9,5	10,0	10,5	2.5	2,5	2,5	3.0	4,2	4,6
		13,7	9,2	10,2	10,7	2,5	3,0	2,7	3,5	4,2	4,6
		9,2	11,0	9,5	9,0	2,0	2,5	2,7	2,5	4,0	5,0
		11,0	10,7	9,5	»	2,0	3,5	»	2,5	4.7	5,8
		»	»	»	»	2,5	»	»	»	4,0	7,5
	Moyenne . .	10,3	10,1	9,7	10,1	2,3	2,9	2,6	2,9	4,2	5,5
28 jours . .		11,5	13 5	13,2	12,5	6,5	10,0	5,5	6,7	10,7	6,7
		12,5	14.5	20,7	10,7	5,7	8,0	5,2	5,5	9,0	6,2
		12,5	15,5	8,7	13,5	6,0	8,0	5.0	8,2	8,0	5,2
		14,0	15,5	13,0	11,0	4,2	6,0	5,7	7,0	7,5	»
		»	»	»	»	4,7	7,2	»	6,2	»	»
	Moyenne . .	12,6	14,7	13,9	11,9	5,4	7,8	5,4	6,7	8,8	6,0

Dans tous les essais on a employé des blocs de marbre aussi semblables que possible les uns aux autres. Les pièces d'essais ont été conservées dans l'eau.

Les essais d'adhérence avec blocs de marbre ou de verre ont été abandonnés parce qu'ils étaient assez difficiles a exécuter. On a trouvé plus simple d'opérer sur des blocs de mortier ayant déjà durci depuis longtemps et de faire adhérer à ces blocs du mortier frais. On trouvera page 224 la description du moule et du procédé employé pour faire ces essais. Voici quelques résultats d'expériences éxécutées avec ces blocs et des mortiers de ciment Portland (A) et de ciment de grappiers et de laitier (B. C. D.) (Voir tableau, p. 139).

6. Stabilité de volume. — Résistance aux influences atmosphériques. — Le ciment Portland de bonne qualité n'a aucune tendance au gonflement; soumis aux alternatives de sécheresse et d'humidité, ou de froid et de chaud, il se comporte également bien et il n'éprouve aucune modification ; il n'est pas détérioré par la gelée, quand les conditions d'emploi sont satisfaisantes.

Sous l'influence de la chaleur, le ciment se dilate un peu, comme le font tous les matériaux de construction. D'après des expériences très précises exécutées au laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées, le coefficient de dilatation de la pâte de ciment pur est à peu près le même que celui du fer (1). Quand le ciment est mélangé avec du sable, la dilatation est d'autant moindre que la proportion de sable est plus élevée.

Les mortiers de ciment peuvent être soumis à des températures très élevées sans qu'il en résulte aucun inconvénient. Des plaques de ciment avec ossature métallique ont été essayées au laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées en vue de se rendre compte si les variations brusques de température ne pouvaient pas les détériorer. Après avoir été portées à des tem-

(1) Commission des ciments, séance du 17 juillet 1890. Les expériences ont été exécutées à l'Ecole des Ponts et Chaussées, sous la direction de MM. Durand Claye et Debray, par M. Klein, chef du dépôt de l'Ecole, et à l'aide d'instruments établis par lui-même.

pératures variant de 90 à 130°, elles ont été plongées brusquement dans l'eau froide ; après cette épreuve, on n'a remarqué sur aucune des plaques ni fissure ni changement de forme.

Quand un mortier est soumis à une température élevée, on constate une diminution de résistance qui est d'autant plus prononcée que le mortier est plus riche en ciment ; toutefois, cette diminution de résistance, due sans doute à la dilatation, n'est jamais assez importante pour qu'il y ait à craindre que, dans la pratique, des variations de 40 à 50° puissent avoir une influence fâcheuse. Des mortiers de ciment Portland, exposés constamment à une température supérieure à 100°, se conservent d'ailleurs parfaitement, pourvu que le produit employé soit de bonne qualité. Les ciments de mauvaise qualité sont, au contraire, profondément altérés quand ils restent exposés assez longtemps à une température voisine de 100°.

Un mortier ayant durci à l'air sec, et qui se trouve exposé ensuite à l'humidité, éprouve également parfois une diminution de résistance, mais celle-ci n'est que passagère et la résistance recommence à croître après quelque temps ; les chutes observées n'ont jamais dépassé 2 à 3 kilogrammes par centimètre carré.

7. Renseignements généraux. *France.* — La production du ciment Portland atteint actuellement en France 400000 tonnes environ. Dans ce chiffre, les usines du Boulonnais entrent pour 300 000 tonnes.

La fabrication du ciment Portland en France n'a pris une certaine extension que depuis une quinzaine d'années. Avant 1880 la production ne dépassait guère 130 000 à 140 000 tonnes, et les usines de Boulogne produisaient à elles seules 60 000 tonnes environ.

La première usine de ciment Portland en France a été créée par MM. Dupont et Demarle en 1846 à Boulogne ; puis vint celle de MM. Darsy et Lefebvre en 1860, celle de MM. Sollier et Cie en 1869. A partir de 1880, les usines se sont multipliées dans le Boulonnais. Elles se trouvent groupées à Desvres, à Neufchâtel et à Dannes et exploitent toutes les mêmes gisements de

marnes crétacées qui sont extrêmement puissants dans cette région. Toutes ces usines travaillent par voie humide.

Dans le Pas-de-Calais également se trouvent les usines de MM. Cambier et Cie, à Pont-à-Vendin et de la société de Pernes, à Pernes-en-Artois ; cette dernière emploie la voie sèche et toutes les deux utilisent de la craie pure et de l'argile. Les mêmes matières sont employées par MM. Candlot et Cie dans l'usine qu'ils ont créée à Mantes en 1893 (1).

Les usines qui emploient la voie sèche sont celles de MM. Vicat et Cie à Grenoble qui date de 1850, et celle de MM. Quillot frères à Frangey (Yonne).

Tout récemment deux autres usines travaillant par voie sèche viennent de se monter ; l'une, construite par MM. Vicat et Cie et Armand est située à Valdonne près de Marseille, la seconde se trouve à Palinges dans le Charollais.

Voici la nomenclature des usines françaises et leur production approximative en 1897.

Société des Ciments français (usines de Boulogne et de Desvres). .	130 000	tonnes
Cie Nlle des Ciments du Boulonnais, à Desvres	45 000	—
Delbende et Cie, à Desvres	20 000	—
Darcy, Lefebvre, Stenne et Lavocat à Neufchâtel, près Boulogne-sur-Mer	30 000	—
Sollier et Cie à Neufchâtel, près Boulogne-sur-Mer.	25 000	—
H. Basquin id.	12 000	—
Société des Ciments de Dannes, à Dannes.	20 000	—
Compagnie Continentale id.	6 000	—
Douez frères, à Samer.	10 000	—
Cambier et Cie, à Pont-à-Vendin (Pas-de-Calais)	15 000	—
Société des Ciments de Pernes, à Pernes-en-Artois (Pas-de-Calais) .	12 000	—
Quillot frères, à Frangey (Yonne).	25 000	—
Candlot et Cie, à Dennemont, près Mantes (Seine-et-Oise)	20 000	—
Vicat et Cie, à Grenoble	20 000	—
Vicat et Armand, à Marseille	10 000	—
Société des Ciments Portland du Charollais, à Palinges	7 000	—
	410 000	—

Angleterre. — La fabrication du ciment en Angleterre est restée à peu près telle qu'elle était il y a 20 ans ; peu d'améliorations ont été apportées et l'on suit toujours les mêmes pro-

(1) Dans la même région, la Société des Ciments français a construit une usine qui vient d'être mise en marche.

cédés qui sont loin d'être perfectionnés. Les matières premières sont composées, d'une part par du carbonate de chaux à peu près pur et facilement délayable, d'autre part par de l'argile de composition régulière. Ces matières premières sont de très bonne qualité et leur régularité de composition explique qu'avec des procédés imparfaits les fabricants de ciment anglais peuvent cependant arriver à livrer des produits qui donnent des résultats satisfaisants. Le traitement des matières se fait par voie humide.

Le carbonate de chaux et l'argile sont introduits dans le délayeur en proportions déterminées ; le dosage se fait au poids. Le mélange s'opère dans le délayeur et il est définitif. La proportion à adopter pour le mélange de carbonate de chaux et d'argile est établie de la manière suivante : On prend un échantillon moyen de craie et un autre d'argile, on les mélange dans les proportions habituelles ; la pâte est séchée et cuite dans un petit four destiné spécialement à ces essais. Le ciment cuit est moulu et essayé au point de vue de la prise et de la résistance à la traction. Si le résultat est bon, on adopte le même mélange pour toute la carrière exploitée, s'il est défectueux, on essaie un autre dosage et on répète la même opération.

Comme les carrières ne sont pas absolument régulières et que la quantité d'eau que contiennent les terres peut amener des variations dans le dosage, on compte sur les bassins de repos pour remédier au défaut d'homogénéité du mélange. Les couches de pâte disposées horizontalement dans les bassins sont reprises en les attaquant dans toute leur hauteur, et on admet que les diverses couches peuvent ainsi se mélanger.

Un ingénieur anglais, M. Redgrave, disait en 1880, en parlant de la supériorité du ciment allemand « Stern » sur le meilleur ciment anglais : « Ce résultat est dû simplement aux « soins et à l'exactitude apportés au mélange de carbonate de « chaux et d'argile et à l'extrême finesse du ciment cuit. S'il « était utile de prouver la lamentable incurie qui règne dans les « fabriques de ciment anglais, il suffirait de penser un instant à « la préférence donnée par M. Baynes aux anciennes méthodes

« et aux bassins de dessèchement comme permettant de corriger « les imperfections du mélange (1) ».

Le délayage est en outre assez grossier ; une grande partie des matières non délayées ou du sable est entraînée dans la pâte ; par suite de leur plus grande densité, ces particules se déposent par couches dans les bassins de repos et le mélange n'est plus homogène.

Pour la cuisson du ciment, on emploie beaucoup les fours séchoirs ; les fours sont généralement de petites dimensions. Les fours ordinaires sont surmontés d'une cheminée en forme de tronc de cône, de 3 à 4 mètres de hauteur. Le combustible employé est, d'une façon à peu près exclusive, le coke de gaz.

Les usines anglaises ne fabriquent qu'une seule qualité qui comprend le tout venant, après soustraction des incuits enlevés à la main avec plus ou moins de soins.

Mais il y a plusieurs catégories marchandes de ciment d'après la finesse de mouture. Il y a quelques années, le ciment était rarement tamisé à la sortie des meules, aussi la poudre était-elle grossière ; elle laissait jusqu'à 15 et 20 % de résidu sur le tamis de 324 mailles et 25 à 30 % sur celui de 900 mailles. Depuis, la mouture ayant été considérablement améliorée dans toutes les usines des autres pays, les fabriques anglaises ont dû apporter plus de soins à la mouture. Mais le ciment anglais est encore loin d'atteindre le degré de finesse que l'on obtient couramment en France et en Allemagne.

La production annuelle totale anglaise peut ainsi se répartir :

Sur la Medway, la Swale et leurs affluents . . .	400 000	tonnes
Sur la Tamise.	400 000	—
Sur la Tyne et pour le reste de l'Angleterre . . .	700 000	—
	1 500 000	—

Comme nous l'avons dit précédemment, la fabrication du ciment Portland en Angleterre remonte à l'année 1825 ; mais elle n'a atteint une certaine importance qu'à partir de 1850. Aujourd'hui, la quantité de ciment fabriquée annuellement dépasse un million et demi de tonnes. Nous trouvons dans la *Revue du*

(1) Scott and Redgrave, and Grant on Portland cement. London, 1880.

Génie (janvier-février 1888) l'énumération des principales usines anglaises.

	Production annuelle
White brothers	100 000 tonnes
Knight, Bevan and Sturge	80 000 —
Lee Son and Smith	80 000 —
Burham	80 000 —
Robins	80 000 —
Johnson	60 000 —
London Portland Cement C°	45 000 —
Wouldham	25 000 —
Harwich	25 000 —
Formby	22 500 —
Walsend	?

Allemagne. — La fabrication du ciment Portland a été introduite en Allemagne par H. Bleibtreu, qui fonda en 1852 à Stettin l'usine de Zülchow. Cette usine ne fonctionna sérieusement qu'en 1856, elle produisait par an 5000 à 6000 tonnes. Bleibtreu installa également à la même époque une fabrique de ciment à Obercassel, près de Bonn, sur le Rhin. Ces deux fabriques existent encore et produisent chacune 30 à 40 mille tonnes par an.

D'autres usines ne tardèrent pas à se construire ; on peut citer parmi les premières celles de Grundmann à Oppeln, de Dyckerhoff à Amonebürg, de l'Etoile à Finkenwalden près de Stettin. Aujourd'hui le nombre des usines importantes s'élève à près de 100 et la production annuelle dépasse 2 000 000 de tonnes.

Le développement considérable et si rapide de la fabrication du ciment Portland en Allemagne n'est pas dû, comme en Angleterre, à la qualité exceptionnellement favorable des matières premières, car on trouve dans beaucoup d'usines allemandes des matières très difficiles à traiter. Mais il faut reconnaître que les fabricants allemands ont fait de très grands efforts pour arriver à livrer des produits de bonne qualité et pour introduire dans leurs usines des procédés rationnels et économiques. Les propriétés et l'emploi du ciment ont été chez eux l'objet d'études approfondies qui ont eu pour résultat de donner à la fabrication des règles précises et au consommateur une grande confiance dans un produit dont il savait apprécier tous les avantages.

Les fabricants allemands se sont réunis en association, ouverte également aux fabricants étrangers, et ils s'assemblent à époque déterminée pour discuter les questions qui intéressent la fabrication, la qualité du ciment, etc. Les essais et les recherches faites dans une usine profitent ainsi à toutes les autres. Cette union des fabricants a une importance qu'il est inutile de mettre en lumière et elle a certainement beaucoup contribué au développement de l'industrie du ciment en Allemagne.

Les usines du sud de l'Allemagne emploient généralement la voie sèche pour la préparation des matières premières ; les usines du Nord travaillent par voie humide ou demi-humide. Dans le procédé par voie sèche, les matières, après dessiccation, sont moulues finement, puis mélangées en proportions convenables et malaxées dans des turbines analogues à celles qui sont employées pour la fabrication des briques ; la pâte sortant des malaxeurs est découpée et forme ainsi des briquettes consistantes ; celles-ci sont séchées sur des aires chauffées par la chaleur de fours à coke. Dans d'autres usines, la poudre sèche, à la sortie des meules, est moulée en briquettes avec addition d'une très petite quantité d'eau ; la poudre est fortement comprimée ; les briquettes sont alors séchées à l'air libre ou sur les fours à cuire, elles sont même parfois enfournées directement.

Quand on emploie la voie humide, on se sert, tantôt de meules humides, lorsque les matières à traiter ne sont pas facilement délayables, tantôt de délayeurs seulement. On emploie pour le délayage 60 à 80 % d'eau.

La pâte claire s'épaissit dans des bassins de repos, puis elle est portée aux malaxeurs où elle est mélangée avec de la pâte qui a été déjà séchée et que l'on a réduite en poudre ; elle devient alors assez ferme pour être moulée sous forme de briquettes qui sont séchées sur les séchoirs des fours à coke. On emploie plutôt maintenant pour le séchage des pâtes le séchoir à tunnel que nous avons décrit plus haut.

Quel que soit le procédé employé, le mélange des matières est définitif une fois qu'elles ont passé aux délayeurs ou aux

meules humides; dans aucune usine il n'existe de bassin de dosage comme en France. Quand les matières sont traitées à sec, on les mélange une fois qu'elles sont réduites en poudre et le dosage se fait au poids ou en volume.

Le calcaire et l'argile sont généralement de composition régulière et on se contente de vérifier de temps en temps par le dosage de l'acide carbonique en volume ou en poids la teneur de la pâte en carbonate de chaux. Voici quelques analyses de calcaires et d'argiles employés par les usines allemandes.

Provenance de l'échantillon	Nature de l'échantillon	Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Carbonate de chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Perte au feu	Produits non dosés
Usine du Rhin. . .	Calcaire.	3,00	0,42	0,53	»	94,50	0,86	0,13	»	0,56
	Argile .	50,70	19,13	8,37	2,68	»	3,20	1,64	13,40	0,88
Usine de Hambourg.	Calcaire.	1,55	0,50		»	97,50	0,19	0,20	»	0,06
	Argile .	52,50	17,35	5,75	4,48	»	3,24	0,94	13,95	1,79
Usine de Stettin . .	Calcaire.	19,70	3,66	1,34	73,92	»	0,97	0,32	»	0,09
	Argile .	54,60	18,20	5,40	2,80	»	3,16	0,99	13,10	1,75

Dans presque toutes les usines, la pâte est moulée en briquettes. Les fours généralement employés jusque dans ces dernières années étaient les fours ordinaires à cuisson intermittente. Ils ont été remplacés presque partout par des fours Dietzsch et au lieu de séchoirs à coke on emploie les canaux de Felner et Ziegler.

On se sert beaucoup également, pour la cuisson, de fours continus système Hoffmann; les briquettes sont alors séchées dans des séchoirs spéciaux ou à l'air libre ou sur le four lui-même.

La mouture s'opère à l'aide de concasseurs, de laminoirs et de meules à la manière ordinaire ; depuis quelques années, on emploie beaucoup les broyeurs à boulets et le moulin Griffin.

Le ciment est moulu très finement; ce sont d'ailleurs les fabricants allemands qui, les premiers, ont attaché à cette qualité du ciment une grande importance. Comme l'essa inormal du ciment se fait avec un mélange de sable, la finesse joue un rôle considérable si l'on veut obtenir de grandes résistances.

En France et en Angleterre, au contraire, on n'essayait le ciment qu'en pâte pure, l'influence de la mouture étant dans ce cas beaucoup moindre, les fabricants ne cherchaient pas à produire du ciment fin.

Dans presque toutes les usines, on fait deux qualités de ciment, l'une à prise lente et l'autre à prise rapide.

Pour obtenir la première, on dose la pâte à 20-23 °/₀ d'argile et on ajoute aux roches, au moment de la mouture, 1 à 2 °/₀ de sulfate de chaux. La durée de prise de ce ciment est de une à plusieurs heures.

Le ciment à prise rapide s'obtient par la cuisson de pâte contenant 24 à 26 °/₀ d'argile; ce ciment doit faire prise en moins de 20 minutes.

Parmi les fabriques les plus importantes de l'Allemagne la plus renommée est celle de MM. Dyckerhoff et fils à Amoneburg près Biebrich, sur le Rhin.

Cette usine a été fondée en 1863 ; en quelques années sa production atteignit 18000 tonnes par an, en 1883 elle s'était élevée à 72000 tonnes et actuellement la production annuelle est de 100000 tonnes.

Les matières premières sont, d'une part, du carbonate de chaux à peu près pur et très dur qui se trouve à proximité de l'usine, et d'autre part de la marne riche en argile ; celle-ci provient de Florsheim et elle est amenée à l'usine par bateaux. Ces matières sont analysées fréquemment et les proportions dans lesquelles elles doivent être mélangées sont déterminées soigneusement. Le laboratoire de cette usine mérite d'ailleurs une mention spéciale, car il est parfaitement installé et les expériences, qui sont faites sous la direction de M. R. Dyckerhoff et du Dr Schumann, ont beaucoup contribué, en Allemagne, à éclairer les fabricants et les applicateurs sur les propriétés du ciment Portland.

La préparation des matières se fait en partie par voie sèche et en partie par voie humide. Pour réduire le calcaire et la marne en bouillie claire, on les fait passer dans des meules verticales et dans des meules humides ; il existe 16 paires de meules humides. La pâte claire, après avoir passé dans des

tamis très fins, est envoyée dans des bassins de repos ; quand elle est assez consistante, elle est reprise et mélangée dans des malaxeurs avec la poudre provenant du traitement des matières premières par la voie sèche.

Les briquettes, à la sortie des malaxeurs, sont séchées sur les fours à cuire ou à l'air libre pendant l'été. MM. Dyckerhoff emploient exclusivement, pour la cuisson, des fours système Hoffann ; ces fours sont au nombre de sept.

Le ciment cuit est réduit en poudre à l'aide de concasseurs, de laminoirs et de 60 paires de meules. Le nombre des ouvriers est de 550.

Les usines de MM. Alsen et fils, de Hambourg, sont celles dont la production est la plus considérable des fabriques allemandes ; une partie des usines est située à Itzehoé et l'autre à Laegerdorf. La préparation et le séchage des pâtes se font à très peu près de la même manière qu'aux usines de Boulogne, mais avec cette différence qu'il n'existe pas de bassins doseurs.

Nous avons dit que la production annuelle des usines allemandes dépassait 2 000 000 de tonnes (1).

Voici les noms des principales usines avec leur production, d'après le compte rendu des séances de l'association des fabricants allemands en 1897.

Alsen'sche Portland cement Fabrik, Hambourg . . .	150 000	tonnes
« Germania » H. Manske et C° Lehrte	135 000	—
Dyckerhoff et Sōhne. Amōneburg bei Biebrich . . .	126 000	—
Hemmoor a.d. Oste, Hemmoor	99 000	—
Schifferdeker et Sohne, Heidelberg	90 000	—
Manheimer P.C.F. Mannheim	90 000	—
Pommerscher, Industrie-Verein auf Aktien, Stettin .	72 000	—
Groschowitz bei Oppeln	72 000	—
Rüdersdorf, R. Guthmann et Jeserich, Berlin. . . .	72 000	—
Stuttgarter Cement-Fabrik Blanbeuren, Stuggart . .	63 000	—
Oppelner P.C.F.-F.W. Grundmann, Oppeln	63 000	—
Oberschlesische P.C.F., Oppeln.	54 000	—
Heyn Gebrüder, Lüneburg	54 000	—
Ludw. Roth, Karlstadt-à-Main	54 000	—

(1) Il n'est pas inutile de faire remarquer que la production ne s'élevait en 1888 qu'à 1.200 000 tonnes environ. On voit ainsi les progrès rapides que fait cette industrie en Allemagne.

Noms des principales usines (*Suite*)

« Stern » Toepffer, Grawitz et C°, Stettin.	45 000 tonnes
Stettiner P.C.F., Stettin	45 000 —
Hannoversche P.C.F., Hannover	45 000 —
Vorwohler P.C.F. Planck et C°, Hannover.	45 000 —
Bonner Bergwerks-und Huttenverein, Obercassel bei Bonn	45 000 —
Sttettin-Gristower P.C.F. E. Kanter et C°. Cammin in Pommern.	45 000 —
A. Giesel, Oppeln	36 000 —
E. Lion et C°, Hambourg.	36 000 —
Breitenburger P.C.F. Hambourg	36 000 —
P.C.F. Halle a.S. Halle a.S	36 000 —
« Wessphalia » Beckum	27 000 —
Bernburger P.C.F. Pazschke et C°.	27 000 —
P.C.F. Blanbeuren, Gebrüder Spohn, Blanbeuren . .	27 000 —
Lothringer Portland Cement Werke, Diesdorf. . . .	27 000 —
Cement Fabrik, Kalkeverke und Dampf-Ziegelei von Heim, Laas Söhne.	27 000 —
Prussing et C°, Göschwitz	27 000 —
Hoxtersche P.C.F. vom J.H. Eichwald Söhne-Höxter .	27 000 —
Portland Cement Werke Höxter-Godelheim, Höxter .	27 000 —
Würtemb. Portland Cement Werke, Lauffen a. Neckar.	27 000 —
Portland Cement Werke Kirchdorf, Hoffmann et C°, Linz a.d.D	27 000 —
C.H. Böcking et Dietzsch, Malstatt bei Saarbrücken .	27 000 —
P.C.F. Kronsberg. Misburg, bei Hannover	27 000 —
Offenbacher P.C.F. Offenbach a.M.	27 000 —
Bremer P.C.F. « Porta » Porta Westfalica.	27 000 —
Wicking'sche Portland Cement Werke, Recklinghausen.	27 000 —
Stettin-Bredower P.C.F. Stettin	27 000 —
Schmidt, Brosang et C°, Wimstorf-Bahnhof	27 000 —
« Adler » Deutsche P.C.F. Zossen.	27 000 —
Plus 13 usines produisant 18,000 tonnes par an. . .	234 000 —
et 12 usines produisant 9,000 tonnes par an. . .	108 000 —
	2 436 000 tonnes

La production de chaque usine est généralement un peu exagérée mais, d'autre part, toutes les usines ne font pas partie de l'association, de sorte que l'on peut admettre que la production totale du ciment Portland en Allemagne est bien près d'atteindre le chiffre énorme de 2 500 000 tonnes.

Les fabricants Allemands calculent leur production en barils de 180 kilogrammes ; on dit, par exemple, qu'une usine fabriquant 9 000 tonnes produit 50 000 barils. Dans l'association des fabricants de ciment, chaque usine est représentée par un certain nombre d'unités, chaque unité correspond à une production de 50 000 barils.

Laboratoire mécanique à l'Institut impérial des Ingénieurs des voies de communication à Saint-Pétersbourg
Directeur du laboratoire : Professeur, N. Belélubsky.

Numéro d'ordre des usines	Traction ciment pur — Eau $^0/_0$	Traction ciment pur — R'_0 kilogrammes par cm² — 4 jours	7 jours	28 jours	2 mois	6 mois	1 an	2 ans	Traction, Mortier 1 : 3 sable normal russe (3 tamis) — Eau $^0/_0$	Traction, Mortier 1 : 3 — R' kilogrammes par cm² — 4 jours	7 jours	28 jours	2 mois	6 mois	1 an	2 ans	Compression ciment pur — R''_0 kg. par cm² — 28 jours	6 mois	1 an	$R'_0 = R''_0$ 28 jours	Compression mortier 1 : 3 — R'' kg. par cm² — 28 jours	6 mois	1 an	R'' = R' — 28 jours	1 an	Mouture — sur 900m	à travers 4900m	Prise — Commencement	Fin	Poids spécifique	Poids du litre non tassé
1. .	25,5	24,0	28,4	43,5	50,0	52,1	»	»	9,75	7,4	9,3	16,1	19,0	25,1	»	»	328	»	»	7,5	123	»	»	7,6	»	5	74	39m	2h	3,14	1 194
2. .	27	»	41,8	55,6	61,2	3,4	64,1	»	10	3 j. 13,8	18,3	22,4	27,4	27,6	»	»	560	»	750	10,1	152	246	291	8,0	8,93	3	86	50	4h,3/4	3,095	1 104
3. .	25,5	»	29,5	37,4	41,5	»	46,7	»	9,5	7,4	9,4	13,4	16,1	»	25,6	»	»	»	»	»	100	»	»	7,5	»	4	65	26	4h	3,15	1 179
4. .	25	»	28,0	42,0	44,4	»	»	48,6	9,75	»	8,1	12,0	13,8	»	»	22,0	»	»	»	»	106	»	»	8,8	»	8	70	26	35m	3,06	1 018
5. .	23,5	»	31,3	47,1	»	60,2	61,2	»	9,75	»	12,3	18,0	»	24,2	»	»	»	»	»	»	188	279	»	10,4	11,6	0	83	45	5h,3/4	3,067	1 082
6. .	22,5	»	39,6	60,3	61,3	65,0	»	»	9,25	»	14,4	22,0	22,6	26,8	»	»	560	790	»	10,8	178	»	»	8,1	»	2	84	90	6h,1/4	,160	1 064
7. .	24,5	»	38,0	50,2	58,1	»	»	»	9,5	»	10,8	14,5	18,6	»	26,1	»	»	»	»	»	148	»	»	10,2	»	2	75	28	36m	3,117	1 144
8. .	27	25,5	39,4	62,4	»	»	63,5	»	10	8,0	12,9	14,7	17,9	24,4	24,0	»	600	»	840	13,9	160	251	315	10,9	10,3	5	74	34	5h	3,165	1 202
9. .	27	3 j. 32,8	42,7	51,3	52,1	»	»	»	9,75	3 j. 11,0	14,3	18,0	20,9	29,4	29,9	»	562	»	»	10,9	156	290	»	8,7	6 m. 9,9	1,5	88	70	7h,1/2	3,14	1 175
10. .	28	34,2	39,0	49,4	50,9	54,2	»	»	10	13,0	15,4	18,3	23,3	27,4	28,7	»	500	»	»	10,1	147	301	»	8,0	10,5	8	75	45	7h,1/4	3 095	1 000
11. .	25,5	»	36,1	48,2	»	»	»	»	10	»	7,8	13,9	16,7	»	»	»	»	»	»	11,6	»	»	»	8,3	»	2	70	30	40m	3,09	1 248
12. .	27	»	35,3	48,7	53,0	»	56,2	»	10,25	»	10,2	15,0	18,2	»	26,2	»	»	»	»	15,9	»	»	»	10,6	»	11	76	35	48m	3,075	1 017

Nota. — Tous les ciments sont invariables de volume.

Russie. — La première fabrique de ciment en Russie fut établie à Polen, en 1857. On compte actuellement dans ce pays 18 usines importantes ; leur production totale dépasse 300 000 tonnes. Nous devons à l'obligeance de M. le professeur Bélélubsky les renseignements suivants sur les usines russes : (voir tableau pagé 151).

Fabriques de ciment Portland en Russie

Cie Schmidt à Riga.
Société par actions de Moscou Podolsk.
Glouchoozersky. — St-Pétersbourg.
Port-Kounda. — Station de Wesenberg. Chemin de fer de la Baltique.
Cie Franco-Russe à Guelendjick — Mer Noire.
Cie Lyphart à Schurowo.
Wyssoka. — Lazy. — Chemin de fer Varsovie-Vienne.
Firley. — Société par actions de Lubline à Lubline.
Grodsiek. — Bondine, Gouvernement de Pétrokow.
Noworossisk. — Mer Noire (ciment naturel).
Usine du Transbaïkal à Werchneondinsk. — Gouvernement de Perm.
Société par actions des usines d'Odessa à Odessa.
Usine de Bogosslowsk. — Gouvernement de Perm.
Savio. — Station de Kervo. — Chemin de fer de Finlande.
Rotertaysky. — Station de Bayan. — Chemin de fer Transbaïkal.
Usine de M. Tandéeff. — Rostow sur-Don.
Usine de Ramischetsky (Sibérie) près Nijnéondinsk.
Usine de Rudniki. — Chemin de fer Varsovie-Vienne.

Belgique. — Il existe en Belgique quatre usines de ciment Portland artificiel produisant en totalité 200 000 tonnes environ :

	tonnes
Société anonyme de Niel on Ruppel	72 000
Dufossez et Henry à Cronfestu	35 000
Levie frères à Cronfestu	36 000
Schmöle et Cie à Beersse	35 000

Les procédés employés en Belgique sont de tous points semblables à ceux des usines allemandes qui travaillent par voie demi-humide. A Niel et à Cronfestu, on emploie pour la cuisson des fours-séchoirs et à l'usine de Beersse on a installé des fours Dietzsch. Une seule usine, celle de Lustin, qui en est à ses débuts, emploie la voie sèche.

Italie. — *Suisse.* — *Autriche.* — On ne fabrique pas en Italie de Portland artificiel proprement dit. Plusieurs usines livrent cependant du ciment Portland, mais c'est un ciment naturel obtenu par la cuisson de calcaires qui donnent soit de la chaux

hydraulique, soit du ciment à prise lente ou à prise rapide selon la teneur en argile et la cuisson plus ou moins élevée. La fabrication est analogue à celle de certains ciments de l'Isère dont nous parlerons plus loin. Les principales usines sont celles de Cazale et de Bergame.

La production du ciment en Italie est de 50 000 à 60 000 tonnes par an ; les mêmes usines produisent environ 75 000 tonnes de chaux hydraulique.

En Suisse la production du ciment Portland est passée de 86.350 tonnes en 1892 à 113.205 tonnes en 1896.

Voici quelles sont les principales usines :

H. Fleiner à Aarau.
Société des usines J. Grandchamp et J. Roche.
R. Vigier et Cie. — Luterbach et Reuchenette.
Fabrique Suisse de Ciment Portland, Saint-Sulpice.
Zurlinden et Cie. — Aarau et Wildegg.
Fabrique de ciment de Laufen.
Basler, à Dittingen.
Gresly frères, Martz et Cie, Liesberg.
J. Orsinger, Emmishofen.
Rotzloch, Ennetmos.
R. Wagner et Cie, Stans.
Brentano et Cie, Mönchenstein.
Feer et Flatt, Frauenfeld.
Fabrique de Châtel Saint-Denis et Vouvry.

En Autriche, également, la fabrication du ciment Portland s'est beaucoup développée ; mais on fabrique surtout du ciment naturel et du ciment romain.

Etats-Unis. — Depuis quelques années, l'industrie du ciment Portland a fait de rapides progrès aux Etats-Unis ; la première usine a été établie en 1873, actuellement on en compte 24 ; les plus importantes sont celles de Saylors, Giant, Egypt et Atlas qui fabriquent à peu près les deux tiers de la production totale estimée à 1500 000 barils en 1897, soit environ 270 000 tonnes. Les principales usines sont situées dans le vallon Lehigh, comtés de Lehigh et Northampton, état de Pensylvanie.

Les matières premières généralement employées sont des calcaires argileux contenant de 65 à 95 % de carbonate de chaux.

Dans l'état de New Jersey on trouve les usines Alpha et Vulcanite qui emploient les mêmes matières premières.

Les usines Empire, Jordan (de la société américaine) et Wayland sont situées dans l'état de New-York ; elles emploient comme matières premières de la craie blanche et de l'argile

bleue. Près de Glenn's Falls N. J., une nouvelle usine a été établie il y a quelques années, elle utilise des calcaires durs comme matières premières.

Dans l'état d'Ohio, on rencontre des usines de ciment Portland à Bellefontaine, à Midlle Branch età Sandusky ; les matières premières sont encore des calcaires durs.

Toutes les usines emploient le procédé par voie sèche ; une seule usine située à Yankton, South Dakota, fabrique par voie humide et emploie de la craie et de l'argile comme les usines du Nord de l'Europe.

Nous donnons ci-dessous quelques tableaux extraits du « Vol. 5 du *Minéral Industry*. New-York 1897. »

Production du ciment dans les États-Unis (en barils de 300 livres)

Etats	1895			1896		
	Barils	Valeur à l'usine		Barils	Valeur à l'usine	
		totale	par baril		totale	par baril
		$	$		$	$
Californie.	12,212	32,566	2,67	8,985	17,970	2,00
New-Jersey	135,000	236,250	1,75	227,100	397,425	1,76
New-York	135,368	308,454	2,28	197,872	304,708	1,54
Ohio	117,706	225,235	1,91	163,182	320,364	1,96
Pensylvanie.	272,048	457,584	1,68	396,739	583,632	1,47
South Dakota	61,725	130,000	2,11	23,776	47,552	2,00
Texas	15.000	40,000	2,67	15,000	38,500	2,56
Total barrils. . . .	749,059	1,430,089	1,91	1,032,654	1,710,151	1,65
Total-tonnes. . . .	135,879	par tonnes	10,53	187,365	par tonnes	9,13

Importation du ciment aux Etats-Unis

Année	Angleterre		Belgique		France		Allemagne	
	tonnes	valeur	tonnes	valeur	tonnes	valeur	tonnes	valeur
		$		$		$		$
1894	208,780 (*a*)	1,255,575	107,426	654,642	3,175	20,084	209,361	1,391,643
1895	161,376	1,014,316	141,775	865,687	4,567	27,842	259,984	1,737,442
1896	127,215	815,053	137,446	800,285	9,283	51,918	245,656	1,623,322

(*a*) Calculées d'après le nombre de barils (1 baril = 400 livres).

Importation du ciment aux Etats-Unis

Année	Autres pays				Total		Exportation	
	tonnes	valeur	tonnes	valeur	tonnes	valeur	tonnes	valeur
		$		$		$		$
1892	»	»	»	»	488,131	3,378,331	15,836	137,167
1893	»	»	»	»	534,830	3,470,169	18,697	154,461
1894	1,239	11,938	9,142	62,847	531,123	3,396,729	23,545	180,881
1895	2,083	18,894	3,394	26,260	599,479	3,873,123	18,516	131,541
1896	1,879	15,989	2,490	21,641	533,535	3,393,199	13,146	103,315

Ciments Portland artificiels américains

Composition chimique (1)

Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique
22,04	6,45	3,41	60,92	3,53	2,73
21,80	7,95	4,95	61,90	1,64	0,79
22,32	7,24	2,46	63,07	3,08	1,04
21,48	7,74	2,70	62,22	2,95	1,03
21,96	8,29	2,67	60,52	3,43	1,49
21,86	7,17	3,73	61,14	2,34	1,94
22,68	6,71	2,35	62,30	3,41	1,88
21,08	7,86	2,48	63,68	2,62	1,25

Essais divers

Résidu sur le tamis							
N° 50 ($2{,}500^m$ par p. carré). . .	98,0	99,5	100,0	99,6	99,7	98,7	100,0
N° 10 ($10{,}000^m$ par p. carré) . .	93,0	92,7	96,4	95,3	94,8	95,8	100,0
Commencement de la prise . . .	$1^h,5$	$0^h,45'$	$1^h\ 25'$	$0^h,3'$	$0^h,1'$	$2^h,0'$	$1^h,0'$
Fin de la prise	$2^h,0$	$1^h,30'$	$3^h,15'$	$0^h,8'$	$0^h,2'$	$5^h,0'$	$2^h,45'$
Ciment pur — Résistance par cm² après 7 jours	$39^{kg},2$	$56^{kg},0$	$43^{kg},4$	$62^{kg},3$	$32^{kg},5$	$44^{kg},0$	$33^{kg},5$
Ciment pur — Résistance par cm² après 28 jours	$40^{kg},2$	$70^{kg},0$	$57^{kg},4$	$60^{kg},5$	$54^{kg},5$	$52^{kg},5$	$45^{kg},3$
Eau de gachage, ciment pur . .	25 %	18 %	23 %	20 %	21 %	24 %	23 %
Mortier 1 : 3 — Résistance par cm² après 7 jours.	$14^{kg},8$	$13^{kg},5$	$13^{kg},4$	$23^{kg},5$	$12^{kg},8$	$17^{kg},8$	$10^{kg},6$
Mortier 1 : 3 — Résistance par cm² après 28 jours	$18^{kg},8$	$24^{kg},5$	$18^{kg},5$	$27^{kg},0$	$29^{kg},1$	$24^{kg},0$	$27^{kg},7$
Eau de gachage	12,5 %	10 %	11 %	10 %	10,5 %	11 %	11 %

(1) Nous devons les renseignements que nous donnons sur les ciments américains à l'obligeance de M. Frederik. H. Lewis, de Philadelphie.

Les fours généralement employés sont les fours ordinaires à cuve et à cuisson intermittente ; on a construit récemment quelques fours Schoefer; dans plusieurs usines, on utilise le four tournant au pétrole et depuis quelque temps on a remplacé le pétrole comme combustible par du charbon pulvérisé.

Danemark. — *Suède.* — *Norwège.* — En Danemark, il existe cinq usines produisant ensemble 70 000 tonnes; les plus importantes sont les usines « Cimbria », « Dania », « Aalborg ».

En Suède, la société « Skaanska cement » à Malmö, dont les usines se trouvent à Lomma et à Limhamn, la société « Oelands Cement », la « Visby cement Fabrik » et enfin la « Hellekis Portland cement Fabrik » produisent 85 000 tonnes.

On ne trouve en Norwège qu'une usine la « Christiania cement » produisant 14 000 tonnes — Enfin, on a monté des fabriques de ciment Portland en Roumanie, en Portugal, au Japon.

II. CIMENT DE LAITIER

1. Fabrication. — Depuis quelques années on utilise certains laitiers de hauts-fourneaux pour la fabrication d'un ciment à prise lente que l'on appelle ciment de laitier ou ciment Pouzzolane.

Le laitier est mélangé avec une certaine quantité de chaux grassse éteinte ou de chaux hydraulique. Mais pour que le ciment puisse acquérir une certaine résistance, il faut que le laitier qui a servi à sa préparation ait été refroidi brusquement à la sortie du haut-fourneau.

Les laitiers qui sont refroidis lentement et qui forment des masses vitreuses, ou ceux qui se pulvérisent spontanément à l'air, ne conviennent nullement pour la fabrication du ciment.

Quand le laitier, à la sortie du four, est projeté dans l'eau, il se réduit en grains peu volumineux et il prend l'aspect de sable; le laitier qui a subi cette opération s'appelle laitier granulé. Le laitier doit être refroidi immédiatement à la sortie du haut-fourneau. « On accélère le changement brusque de température

en refroidissant le jet de laitier aussi près que possible de la tuyère, en lui injectant, par un robinet superposé, un excès d'eau sous pression qui l'entraîne par une rigole jusqu'à un bac où il se dépose sous forme de sable granuleux. Après chaque coulée, on retire le sable contenu dans le bac à l'aide de pelles en tôle perforée pour faciliter l'écoulement de l'eau. Le commencement et la fin d'une coulée sont généralement rejetés : le laitier coule alors plus noir par suite du refroidissement dû à la lenteur de l'écoulement. Pour la même raison on n'utilise pas le laitier des hauts-fourneaux à écoulement constant car il leur manque le coup de feu qui les maintient en allure chaude. Avec un peu d'habitude on peut reconnaître à l'œil nu la qualité d'un laitier ; pour un même fourneau, plus il est spongieux et bleuté, plus il est basique et d'allure chaude ; au contraire, plus il est vitrifié et noirâtre, moins il est propre à une bonne fabrication du ciment (1). »

Le laitier doit être basique ; d'après M. Tetmajer, quand le rapport $\frac{CaO}{SiO^2}$ descend au-dessous de 1, le laitier n'est pas utilisable ; le rapport de la silice à l'alumine doit être compris entre 0,45 et 0,50.

D'après M. Prost (2), la composition des laitiers employés habituellement dans la fabrication des ciments de laitier serait représentée à peu près par la formule $2SiO^2$, Al^2O^3, $3CaO$; les laitiers répondant à la formule $2SiO^2$, Al^2O^3, $4CaO$ donnent également du ciment de laitier de bonne qualité, mais il faut qu'ils soient refroidis très brusquement et immédiatement après leur sortie du haut-fourneau.

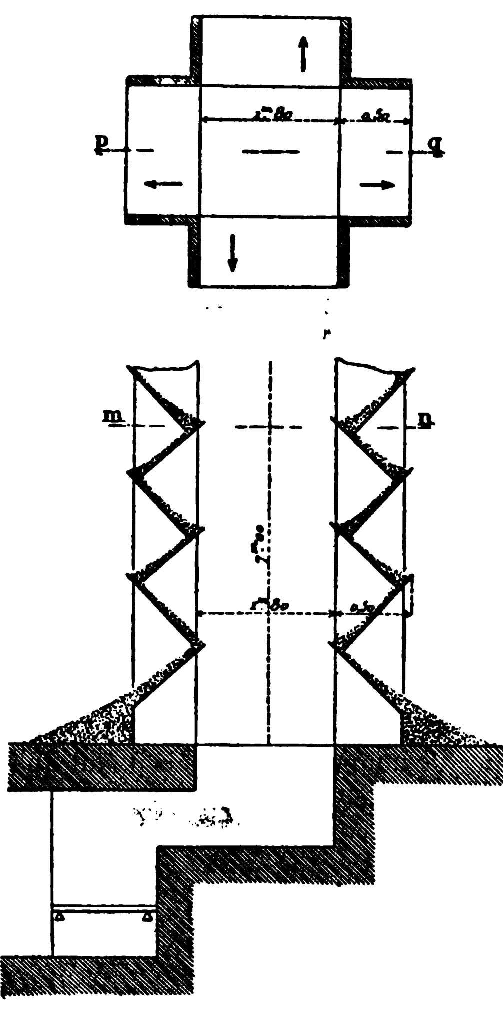
Il existe relativement peu de hauts-fourneaux qui produisent un laitier susceptible de produire du ciment de qualité convenable ; aussi cette fabrication n'a-t-elle pas pris une grande extension.

Le laitier granulé est poreux et les grains retiennent une assez grande quantité d'eau ; il faut donc commencer par le sécher

(1) *Annales de la Construction* (février 1896).

(2) Note sur la fabrication et les propriétés des ciments de laitier, par M. Prost, ingénieur des Mines. *Annales des Mines*, 8e série, t. XVI, p. 158 à 208.

complètement. Divers appareils sont employés pour le séchage, un des meilleurs est celui qui a été installé à l'usine de Vitry. Le sable est réparti entre cinq étuves ou sections à tablettes par un élément transporteur qui le distribue automatiquement ; c'est une sorte de vis métallique dont la partie centrale est évidée pour éviter l'engorgement par accumulation des matières qui pourraient s'élever jusqu'aux paliers de l'arbre de la vis et les faire gripper.



60. — Séchoir pour laitier.

Chacune des étuves (*fig.* 60) se compose de quatre séries de planchettes en tôle superposées, inclinées en sens inverse et fixées par les bords à quatre montants verticaux qui encadrent ainsi un espace clos, sorte de cheminée dans laquelle s'élèvent les gaz de la chauffe. L'appareil comporte sur chaque face dix planchettes étagées sur 7 mètres de hauteur. La partie centrale étant fermée vers le haut par une plaque de tôle, les gaz produits par un chauffage au coke métallurgique ordinaire circulent lentement en échauffant progressivement les diverses couches de laitier qui descend de lui-même de planchette en

planchette dès qu'on dégarnit au bas le tas déjà séché, dont on augmente ainsi le talus.

Le laitier séché doit être ensuite moulu très finement; on emploie des meules ordinaires, les broyeurs Morel ou autres que nous avons décrits déjà plus haut.

Il ne reste plus qu'à mélanger intimement la farine de laitier avec la chaux en poudre; la proportion généralement adoptée est de 30 à 40 de chaux pour 60 à 70 de laitier; mais on peut faire le mélange dans des proportions très différentes.

On ne peut obtenir un produit convenable que si le mélange est parfaitement intime; l'appareil qui est généralement employé pour cette opération est le pulvérisateur à boulets appelé aussi homogénéisateur. Cet appareil se compose d'un tambour en tôle d'acier tournant autour d'un axe horizontal et contenant 1 600 kilogrammes de billes en fonte spéciale. Le mélange est introduit dans l'appareil que l'on ferme hermétiquement, et on le fait fonctionner pendant un temps plus ou moins long; on le vide alors, on le remplit de nouveau et ainsi de suite.

L'homogonéisation peut se faire aussi dans des appareils à marche continue; on emploie pour cette opération le broyeur Schmidt, le broyeur Luther, etc.

Il parait indifférent d'employer, pour mélanger avec le laitier, de la chaux grasse ou de la chaux hydraulique. Dans tous les cas, la chaux doit être parfaitement éteinte.

2. Propriétés. — *Composition chimique.* — La composition des ciments de laitier peut varier dans des limites assez étendues. Ces ciments contiennent en général plus d'alumine et moins de chaux que les ciments Portland. Ils renferment toujours une certaine quantité de sulfure de calcium qui peut dépasser 3 et 4 %. C'est à cet élément que le ciment de laitier doit la teinte verte qu'il prend quand il est conservé dans l'eau; à l'eau de mer cette teinte est beaucoup plus accentuée. Quand on casse une briquette de ciment de laitier ayant séjourné quelque temps dans l'eau de mer, l'intérieur est noir-verdâtre et le mortier répand une odeur très prononcée d'hydrogène sulfuré. Le sulfure de calcium est un peu soluble dans l'eau ordinaire

et plus soluble dans l'eau salée. Si on agite dans l'eau de mer une certaine quantité de ciment de laitier, et qu'après avoir laissé la poudre se déposer, on décante le liquide clair et qu'on y verse quelques gouttes d'acide chlorhydrique, on perçoit aussitôt l'odeur caractéristique de l'hydrogène sulfuré. (Voir tableau n° 18).

Densité. — Le ciment de laitier est léger ; le poids du litre de ciment non tassé atteint rarement 1 kilogramme ; le poids spécifique est compris entre 2,7 et 2,8. (Voir page 110.)

Finesse. — La finesse de ce ciment est en général très grande, le résidu sur le tamis de 900 mailles s'élève à 4 % au maximum et sur celui de 4 900 mailles à 20 %. Ce produit ne peut d'ailleurs donner de résultat convenable qu'à la condition d'être extrêmement fin.

Prise. — La prise est généralement très lente ; elle ne se produit, à l'eau douce, qu'après 8 à 10 heures et quelquefois beaucoup plus, pour le ciment pur. Quand le ciment est mélangé avec du sable et gâché à la consistance ordinaire du chantier, la prise est plus lente et le durcissement ne commence à être appréciable qu'après 15 à 20 heures. Par l'addition de certaines matières au ciment de laitier on peut activer un peu la prise ; la silice, l'aluminate de chaux peuvent être utilisés dans ce but ; mais leur action ne paraît pas persister longtemps, et quand le ciment est conservé en sacs principalement, la prise se ralentit en peu de temps.

Résistance. — On trouvera dans le tableau 19 des résultats d'essais de résistance exécutés sur divers échantillons de ciments de laitier. Ces essais font voir que le ciment gâché pur n'atteint pas une grande résistance ; celle-ci est souvent plus élevée quand le ciment est mélangé avec trois parties de sable ; aussi les mortiers 1 : 1 et 1 : 2 ne donnent-ils pas de résultats bien différents de ceux du mortier 1 : 3 ; nous avons signalé le même fait pour les chaux.

Quand on mélange avec le ciment plus de trois parties de sable les résultats sont relativement moins satisfaisants. Les

essais que nous reproduisons ont été exécutés en comprimant fortement le mortier dans les moules ; le mortier gâché à la consistance ordinaire du chantier atteint une dureté beaucoup moins élevée.

Les mortiers de ciment de laitier atteignent leur maximum de résistance au bout de quelques mois ; le ciment pur immergé en eau de mer donne des résistances plus fortes que dans l'eau douce, mais au bout de très peu de temps on observe des chutes très importantes et la charge de rupture n'atteint plus que quelques kilos.

Le ciment de laitier ne donne de bons résultats que dans l'eau ou à l'humidité ; à l'air sec la résistance reste très faible. Les enduits faits avec ce ciment se fissurent et sont peu résistants. M. Tetmajer s'exprime ainsi au sujet de l'emploi du ciment de laitier à l'air :

Dans les constructions à l'air où on ne peut conserver la matière humide, pendant environ une semaine, et où celle-ci est exposée à l'action du soleil, on fera mieux de ne pas employer le ciment de laitier. Des ciments de laitier à forte teneur en chaux (40 à 50 %) peuvent, après plusieurs années de conservation à l'air, se désagréger à la surface et tomber en poudre par suite du fendillement.

La résistance relativement faible du ciment pur et des mélanges avec peu de sable ne permet pas d'employer ce produit avec succès pour les dallages et, en général, dans tous les travaux qui nécessitent une très grande dureté et qui doivent résister soit à l'usure, soit au choc.

Le ciment de laitier ne paraît pas jusqu'à présent résister longtemps à l'action décomposante de l'eau de mer. Les mortiers faits avec ce ciment, quand ils sont suffisamment perméables, sont attaqués rapidement par la solution de sulfate de magnésie à 6 ‰.

Le ciment en poudre ne peut pas se conserver longtemps dans un endroit humide car la chaux se carbonate rapidement et l'énergie du ciment est considérablement diminuée.

L'étude de M. Tetmajer sur le ciment de laitier se termine par ces mots :

En général nous nous sommes efforcé de donner des renseignements aussi circonstanciés que possible, sur la nature, les conditions de fabrication, les avantages et les inconvénients du ciment de laitier et spécialement sur les expériences acquises sur le ciment de laitier suisse. Nous avons intentionnellement évité de faire, autant qu'il était possible, des comparaisons avec les agglomérants modernes universellement connus. Nous avons agi de la sorte parce que, à notre avis, l'agglomérant relativement nouveau qui vient d'être décrit, n'est pas appelé à supplanter ceux existants, et parce que nous ne voulons pas suivre l'exemple de ces expérimentateurs qui se permettent d'étendre à tout un genre les propriétés d'une espèce et d'en tirer des conclusions *pro domo* (1).

Extrait des prescriptions normales de M. Tetmajer au sujet des ciments de laitier :

Les ciments Pouzzolane sont des produits qui s'obtiennent par le mélange intime d'hydrate de chaux en poudre avec des gangues hydrauliques finement pulvérisées.

Les mélanges de gangues hydrauliques finement pulvérisées avec des hydrates de chaux en poudre peuvent fournir des mortiers hydrauliques qui, suivant la nature des matières premières employées, sont susceptibles d'acquérir les qualités techniques importantes des ciments les plus estimés. Les ciments de cette catégorie doivent être désignés d'après le nom de la matière employée comme base de fabrication ; on les désignera donc, par exemple, sous le nom de ciment de laitier, ciment de trass, etc.

Les ciments Pouzzolane fabriqués de cette manière perdent le caractère sabloneux des matières qui les composent ; ils deviennent une poudre farineuse et soyeuse.

La couleur des ciments Pouzzolane correspond à celle de la gangue employée. Gâchés avec de l'eau ces ciments n'indiquent aucune élévation de température et ils font prise, en général, lentement. Fabriqués avec exactitude les ciments Pouzzolane ne travaillent pas ; ils ont par contre une tendance à se fendiller.

(1) L'analyse des recherches de M. Tetmajer sur le ciment de laitier a été publiée dans les *Annales de la Construction* (juillet 1886) et dans le *Journal du Céramiste et du Chaufournier*, 1887.

Les ciments de laitier, la seule espèce de ciment-Pouzzolane fabriquée industriellement jusqu'à ce jour, sont d'un emploi recommandable dans tous les travaux sous l'eau et à l'humidité dont l'exécution n'est pas nécessairement très rapide et où l'on n'exige pas une résistance initiale particulièrement élevée. Les ciments de laitier conviennent aussi bien que le mortier de trass pour les bétons coulés directement dans l'eau.

A l'air ils perdent de leur force par suite de leur fendillement et de l'évaporation de l'eau de l'hydrate de chaux.

En général, leur emploi ne se recommande pas pour les constructions exposées à l'air et soumises à une usure mécanique.

Le poids spécifique des ciments de laitier est dans la plupart des cas inférieur à 2,8 ; leur perte par calcination varie de 5 à 10 $^0/_0$.

La résistance normale du mortier composé de 1 de ciment de laitier pour 3 de sable normal doit s'élever au moins à 16 kilogrammes par centimètre carré après 28 jours, à la traction, et à 140 kilogrammes à la compression.

3. Renseignements généraux. — Les premières usines de ciment de laitier ont été établies en Allemagne mais cette fabrication a presque complètement disparu dans ce pays. En Suisse, l'usine de Choindez existe toujours, mais tandis que les fabriques de ciment Portland se sont multipliées, le ciment de laitier n'a fait aucun progrès. En Belgique il ne reste non plus qu'une usine de ciment de laitier à Haaren près de Bruxelles.

En France il existe quelques usines : MM. Raty et Cie à Saulnes, Henri et Cie a Donjeux et à Bourges, Société de Neuves-Maisons, Pavin de Lafarge à Vitry; enfin dans le midi l'usine de Laudun est, croyons-nous, la seule qui subsiste encore.

CHAPITRE III

—

CIMENTS NATURELS — CIMENTS MIXTES
CIMENTS DE GRAPPIERS
CIMENTS PROMPTS — CIMENTS ROMAINS
POUZZOLANES — TRASS

1. Ciments Portland naturels. — Pour obtenir un ciment Portland de bonne qualité on a vu que la composition chimique devait être absolument constante et qu'elle ne pouvait s'écarter de certaines limites très étroites.

Dans la nature, on trouve bien des calcaires ayant précisément la composition convenable pour la production du Portland, mais il est très rare que ces calcaires existent en masses assez considérables ou bancs assez réguliers pour permettre une fabrication un peu importante.

On a découvert cependant quelques gisements qui sont exploités et qui produisent des ciments se rapprochant plus ou moins du Portland.

On désigne aussi sous le nom de Portland naturel le produit de la cuisson de calcaires à indice beaucoup plus élevé que celui du Portland ; ce sont plutôt des calcaires à ciment prompt qui sont portés à une température suffisante pour éprouver un commencement de fusion ; par suite de cette cuisson intense le ciment prend lentement.

Avec ces mêmes calcaires on fait d'ailleurs plusieurs sortes de ciments ; les parties complètement vitrifiées donnent le ciment à prise lente, les morceaux moins cuits le ciment à prise demi-lente et enfin les parties qui, sans être incuites, ne sont pas cependant vitrifiées constituent le ciment prompt.

Quand on emploie ces calcaires à indice élevé, on peut se contenter d'une régularité de composition moins grande que pour le ciment Portland artificiel; l'excès de chaux est en effet beaucoup moins à craindre. Malgré cela cependant il est nécessaire de laisser ces ciments en silos pendant plusieurs semaines après la mouture, car si on les emploie immédiatement ils augmentent presque toujours de volume. C'est donc là une différence essentielle avec le ciment Portland artificiel.

La résistance est également moins élevée que celle du Portland, surtout pendant les premières semaines. (Tableau n° 19.)

A part la préparation des matières premières, la fabrication de ces ciments ne diffère pas sensiblement de celle des Portland artificiels. La cuisson s'opère dans les fours ordinaires, à cuve, et elle est intermittente. Pour la mouture on se sert généralement de concasseurs et de meules.

2. Ciments mixtes. — On vend également sous le nom de Portland artificiel des ciments qui, non seulement ne présentent pas la composition de ce produit, mais dont la fabrication n'a rien de commun avec la sienne. Nous voulons parler des ciments composés de ciment naturel et de grappiers de chaux mélangés en proportions variables.

M. Gobin, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, a publié dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (juin 1889) une étude très complète sur les ciments de l'Isère, qui sont en partie fabriqués de cette façon ; il proteste avec raison contre la dénomination de ciment Portland artificiel appliqué à un pareil mélange.

Ce ciment, dit cet ingénieur, se composant de deux ciments naturels à prise de durée différente et mélangés après cuisson, dans le but d'obtenir une prise de durée moyenne, n'est pas un ciment artificiel, dans le

sens qu'on attribue ordinairement à ce qualificatif que Vical a appliqué la première fois au mélange de chaux et argile donnant, par une cuisson convenable, un produit hydraulique. Ce dernier ciment seul doit être appelé artificiel et le premier, ayant une grande analogie avec la chaux hydraulique appelée mixte, comprenant à la fois la chaux hydraulique légère et la chaux lourde, nous pensons qu'il serait plus rationnel de l'appeler ciment Portland mixte (1).

A notre avis, il serait préférable de désigner ces ciments sous le nom de ciments mixtes simplement ou de ciments mélangés, comme cela se fait en Allemagne et en Suisse. Le nom de Portland s'applique à une catégorie de produits parfaitement définis et il ne paraît pas possible de le donner aussi bien à des ciments absolument homogènes et de composition constante et à des ciments provenant de calcaires de propriétés très différentes mélangés après cuisson.

Les ciments mixtes sont composés, comme nous l'avons dit, par le mélange des calcaires cuits qui servent à faire le ciment naturel, ou plus souvent le ciment prompt, avec des grappiers de chaux hydraulique. Le mélange se fait avant la mouture.

On fabrique ainsi deux espèces de ciment, le ciment à prise lente et le ciment à prise demi-lente, la proportion de ciment prompt étant moins élevée dans le premier que dans le second.

(1) MM. Durand Claye et Debray ont sanctionné cette manière de voir en adoptant la classification suivante : (Documents lus à la commission des ciments au ministère des travaux publics, séance du 17 juillet 1890).

Chaux hydrauliques naturelles ou artificielles.

Ciments de grappiers de chaux.

Ciments dits à prise rapide (genre Vassy).

Ciments Portland naturels.

Ciments mixtes généralement obtenus par la mouture d'un mélange de grappiers de chaux et de roches de ciment.

Ciments Portland artificiels.

Ciments de laitier.

On ne saurait en effet confondre absolument sous l'unique dénomination de ciments, disent MM. Durand Claye et Debray, des produits qui, pour avoir quelques qualités communes, se distinguent par des différences de fabrication tellement grandes, qu'elles doivent, sinon immédiatement, du moins dans un temps déterminé, amener quelques différences dans la manière d'être des pâtes et mortiers, ne serait-ce qu'au point de vue de la coloration.

Le centre de la fabrication de ces ciments se trouve dans l'Isère ; c'est dans cette région que l'on trouve certainement la plus grande variété de ciments. C'est ainsi que l'on y fabrique :

1° le ciment à prise très rapide	calcaires naturels, cuisson modérée
2° le ciment à prise rapide	
3° le ciment à prise demi-lente	
4° le ciment Portland naturel prise très lente	calcaires naturels, cuisson plus énergique
5° — — prise demi-lente	
6° le ciment Portland artificiel.	
7° le ciment mixte à prise lente	mélanges de ciment prompt avec des grappiers de chaux.
8° le ciment mixte à prise demi-lente	

9° le ciment mixte à prise lente composé de ciment prompt, de ciment de grappiers et de ciment artificiel.

10° enfin le ciment de grappiers.

Pour ces ciments le séjour en silos est indispensable, afin d'assurer l'extinction de la chaux libre qu'ils contiennent en plus ou moins grande quantité, quand ils viennent d'être moulus. Les ciments prompts ne restent que quelques semaines en silos ; les ciments lents et les ciments mixtes y séjournent pendant plusieurs mois. D'après M. Gobin, l'extinction tardive de la chaux libre détermine dans les silos une élévation de température qui peut atteindre 10°.

3. Ciments de grappiers. — Nous avons dit en quoi consistaient les grappiers de chaux. Le traitement que l'on fait subir à ces grappiers pour les transformer en ciment a pour but de les débarrasser, aussi complètement que possible, de la chaux éteinte avec laquelle ils sont mélangés et des parties de chaux surcuite qui s'éteignent à la longue. Après les avoir soumis à plusieurs extinctions et blutages successifs, on les réduit en poudre fine qui est conservée en silos plusieurs mois.

On conçoit que ces ciments doivent donner des résultats assez variables en raison des difficultés que présente l'extinction complète de la chaux surcuite.

Au Teil, les opérations nécessitées par la transformation des grappiers en ciment sont très nombreuses. On fait d'abord

passer les grappiers dans des meules qui sont assez écartées l'une de l'autre, ce qui a pour effet de produire une sorte de décortication, c'est-à-dire que les grappiers se trouvent débarrassés de la farine de chaux qui les recouvre, et les parties tendres composées de chaux agglomérée sont réduites en poudre. Celle-ci est éliminée par un blutage et on la mélange avec la fleur de chaux.

Le résidu du blutage reste exposé à l'air pendant plus d'un mois, après quoi il est bluté de nouveau ; la poudre résultant de ce deuxième blutage constitue la chaux lourde, que l'on désigne aussi sous le nom de ciment blanc.

Enfin les parties qui ont résisté à l'extinction sont broyées sous des meules ; il est d'une grande importance que pendant la mouture il se produise un échauffement assez considérable pour produire une certaine quantité de vapeur d'eau, qui doit éteindre les particules de chaux libre qui n'ont pas encore été hydratées. Toutefois, il ne faut pas que la température soit trop élevée, ce qui pourrait diminuer la résistance du produit. La poussière sortant des meules est tamisée et il reste encore un résidu qui est réduit en poudre à son tour à l'aide d'un broyeur spécial.

Le ciment ainsi fabriqué ne peut pas encore être utilisé immédiatement ; il doit rester en silos un temps plus ou moins long jusqu'à ce que l'on soit assuré que la chaux libre a été complètement éteinte.

Dans d'autres usines, on se contente de laisser les grappiers à l'air pendant quelques semaines puis on les réduit en poudre aussi fine que possible ; celle-ci est conservée en silos pendant plusieurs mois (1).

PROPRIÉTÉS DES CIMENTS NATURELS A PRISE LENTE

Composition chimique. — La composition des ciments naturels ou mixtes s'écarte assez sensiblement de celle du Portland ;

(1) Voir l'article de M. A Gobin dans le numéro d'octobre 1887 des *Annales des Ponts et Chaussées*.

ils renferment en général moins de silice et plus d'alumine ; la proportion de sulfate de chaux est aussi plus élevée. L'indice d'hydraulicité varie entre 0,50 et 0,70.

Les ciments de grappiers sont presque toujours siliceux ; les meilleurs ne renferment pas plus de 1 à 2 % d'alumine. (Voir le tableau n° 18.)

Densité. — Les ciments naturels ou mixtes ont une densité apparente peu élevée. Le poids spécifique est inférieur à celui du ciment Portland. Les ciments de grappiers sont aussi très légers et leur poids spécifique est compris entre 2,7 et 2,9. (Voir page 110.)

Finesse de mouture. — La finesse de mouture des ciments naturels et mixtes est assez irrégulière ; en général ils sont assez grossièrement moulus ; le résidu sur le tamis de 900 mailles s'élève souvent jusqu'à 20 %.

Les ciments de grappiers de bonne qualité sont plus finement moulus, c'est d'ailleurs pour ces ciments une condition essentielle.

Prise. — La prise des ciments demi-lents varie entre 30 minutes et 3 heures ; celle des ciments lents se produit entre 4 et 8 heures. Les ciments de grappiers font prise très lentement, et le durcissement ne commence à être appréciable qu'au bout de 12 à 15 heures.

Résistance. — La résistance des ciments de l'Isère présente une allure différente de celle du Portland. Quelques heures après la prise, le mortier paraît avoir une dureté assez grande, mais la résistance reste stationnaire pendant longtemps et ce n'est qu'après plusieurs mois qu'elle peut être comparée à celle du Portland ; pendant les premières semaines elle lui reste beaucoup inférieure. Quelquefois ces ciments, après avoir présenté des résistances très faibles pendant les premières semaines, finissent par donner, au bout d'un an ou deux, des résistances assez élevées (1).

(1) L'allure du durcissement des ciments de l'Isère est tout à fait comparable à celle des ciments Portland additionnés de 3 à 4 % de sulfate de chaux (Voir annexe I). Il

Ces ciments sont fréquemment désagrégés qnand on les immerge en eau de mer à cause de la chaux libre qu'ils contiennent presque toujours. Ce sont surtout les ciments mixtes à prise très lente qui sont altérés par l'eau de mer et aussi les ciments naturels provenant de calcaires cuits très fortement. Dans ce cas le sulfate de chaux peut à lui seul provoquer la désagrégation.

On trouvera tableau nº 19 quelques résultats d'essais faits sur des ciments naturels, des ciments mixtes et des ciments de grappiers.

1. Ciments à prise rapide. — Ciments romains. — *Historique.* — La découverte du ciment à prise rapide remonte à l'année 1796; à cette époque James Parker obtint une patente royale pour la fabrication d'un ciment qu'il nomma ciment Romain. Il utilisait des calcaires des environs de Londres et il les cuisait à une température peu élevée ; ces calcaires contenaient 30 à 35 °/₀ d'argile. Le produit de la cuisson, au lieu d'être soumis à l'extinction, comme on le faisait pour les chaux, était pulvérisé, et la poudre, gâchée avec de l'eau, avait la propriété de faire prise très rapidement et d'acquérir en peu de temps une grande dureté.

Quelques années plus tard on découvrit à Boulogne-sur-mer un gisement de calcaire à ciment. Ces calcaires, disséminés dans l'argile qui forme une partie des falaises, se trouvaient séparés de celle-ci par l'action de la mer qui, délayant l'argile, laissait sur la plage les pierres à ciment que l'on ramassait à marée basse.

Les pierres cuites à une température modérée donnaient un ciment à prise rapide ; on l'appelait alors plâtre-ciment. La fabrication de ce produit existait encore en 1875 ; depuis elle a été complètement abandonnée.

En 1825, on commença à fabriquer du ciment à prise rapide à Pouilly ; puis ce fut dans la région de Vassy que cette indus-

est à remarquer que les ciments de l'Isère contiennent presque tous des quantités de sulfate de chaux dépassant 4 °/₀.

trie prit le plus d'extension ; dans l'Isère elle atteignit également un développement assez considérable.

En Allemagne, en Suisse et en Russie il existe un nombre assez limité d'usines fabriquant un ciment que l'on désigne sous le nom de ciment romain ; mais contrairement à l'habitude que l'on a en France de désigner indifféremment le ciment à prise rapide sous ce nom ou sous celui de ciment romain, on fabrique du ciment romain à prise lente et à prise prompte.

La dénomination de ciment romain comprend tous les produits hydrauliques provenant de calcaires très argileux soumis à une température modérée et pulvérisés par des moyens mécaniques.

Les prescriptions normales suisses dont nous avons déjà parlé, donnent la définition suivante des ciments romains :

Les ciments romains sont des produits obtenus par la cuisson de calcaires argileux à fortes proportions d'argile, au-dessous de la limite de fusion, ne s'éteignant pas lorsqu'ils sont arrosés avec de l'eau, et devant par conséquent être soumis à une trituration mécanique pour être réduits en poudre.

Remarque. — Un certain nombre de calcaires argileux, de composition chimique et physique déterminée, lorsqu'ils sont suffisamment cuits, fournissent du ciment romain, à condition que la cuisson ne soit pas poussée jusqu'à vitrification. Exposés aux influences atmosphériques ou arrosés avec de l'eau, ces calcaires ne tombent en poussière que partiellement ou après un temps prolongé ; ils doivent par conséquent toujours être pulvérisés au moyen d'appareils de mouture spéciaux.

Le produit de la mouture est de couleur jaunâtre avec des nuances rouges-brunes. Gâché, le ciment romain augmente de température suivant la nature de la matière première, le traitement auquel sont soumises les pierres cuites et la durée du temps de séjour en silos.

Les conditions de la prise varient également ; dans la plupart des cas le durcissement des ciments romains commence déjà au bout de quelques minutes.

Les ciments romains doivent avoir un volume inaltérable soit à l'air, soit sous l'eau, et ne doivent ni se fendre ni se désagréger.

Le poids spécifique du ciment romain est variable et ne peut s'élever

qu'exceptionnellement jusqu'à 3,00. La perte par calcination dépasse rarement 5 %.

Les ciments romains sont employés partout où il s'agit avant tout de faire des moulages rapides, d'arrêter des filtrations et où la résistance n'est pas très urgente.

Fabrication. — La fabrication des ciments prompts n'offre rien de particulier. L'extraction du calcaire présente généralement plus de difficultés que pour les chaux hydrauliques car il n'y a que certains bancs qui peuvent être utilisés ; on les reconnaît d'ailleurs assez facilement par leur couleur et leur texture.

La cuisson s'opère dans des fours coulants et la marche des fours est analogue à celle des fours à chaux. La pierre, à la sortie du four, reste quelque temps à l'air ; elle absorbe ainsi un peu d'humidité ; puis elle est réduite en poudre sous des meules. Après avoir été bluté, le ciment est conservé en silos pendant un temps plus ou moins long avant d'être mis en sacs. S'il était employé trop peu de temps après la cuisson, la durée de prise serait, en effet, extrêmement rapide ; il faut que le ciment ait été un peu éventé pour que son emploi devienne possible. Le séjour en silos est aussi nécessaire pour assurer l'extinction de la chaux libre que les ciments prompts contiennent souvent en plus ou moins grande quantité.

Lorsqu'un calcaire à ciment prompt est cuit à une température très élevée et qu'il a subi un commencement de vitrification, il n'est plus susceptible de produire du ciment à prise rapide. Parfois ces calcaires peuvent fournir un ciment à prise lente ; nous avons vu que dans l'Isère on fabrique ainsi une certaine quantité de ciment que l'on vend sous le nom de ciment Portland. Dans d'autres cas les morceaux vitrifiés peuvent être considérés comme une matière inerte, au moins pendant les premiers temps du durcissement ; à la longue ils finissent probablement par s'hydrater, ou bien ils jouent le rôle de pouzzolane.

La régularité de composition des calcaires que l'on porte aux fours est bien plus importante dans la fabrication des ciments prompts que dans celle de la chaux hydraulique. Si, en

effet, il se trouve, en quantité notable, des parties trop riches en chaux, celles-ci se trouvent mélangées dans le ciment avant d'être hydratées et elles peuvent déterminer le gonflement du mortier. Le séjour en silos serait insuffisant pour améliorer le produit, car il faudrait, pour assurer l'extinction de la chaux, éventer complètement le ciment qui perdrait ainsi sa qualité principale, c'est-à-dire la rapidité de prise.

Avec des calcaires trop riches en argile on a un inconvénient moindre, puisque ceux-ci ne peuvent constituer tout au plus qu'une matière inerte ; mais la marche des fours devient très difficile à régler, les pierres vitrifiées s'attachent aux parois et, en se soudant les unes aux autres, empêchent la descente des matières et la cuisson est irrégulière.

Propriétés. — Dans le plus grand nombre de cas on demande au ciment prompt une prise de 5 à 10 minutes, et un durcissement immédiat assez élevé. Ce ciment atteint, en effet, en quelques heures une dureté relativement grande mais qui n'augmente pas par la suite dans la même proportion.

Les mortiers de ciment prompt ne supportent pas une grande quantité de sable. On emploie ordinairement un volume de ciment pour un ou deux volumes de sable, ou bien deux volumes de ciment pour cinq de sable.

Le ciment prompt employé pur est sujet au fendillement quand il reste à l'air, ou lorsqu'il est alternativement exposé à la sécheresse et à l'humidité ; il prend dans ces conditions un retrait assez important. Le sable atténue un peu cet inconvénient.

La densité des ciments à prise rapide varie de 680 à 1 000 grammes pour le poids du litre ; le poids spécifique est compris entre 2,8 et 3,00 ; la finesse de mouture n'est généralement pas très grande.

Composition chimique. — Voici quelques analyses de ciments prompts de diverses provenances.

Composition chimique

Provenance des ciments	Résidu sableux	Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Perte au feu	Matières non dosées	Indice d'hydraulicité
*L'albarine . . .	2,40	25,45	9,25	3,85	47,85	1,45	0,70	8,95	»	0,72
*Argenteuil . . .	»	29,55	8,35	4,10	47.50	3,85	1,35	5,30	»	0,80
*Yonne	»	23,40	12,90	3,30	47,70	1,05	3,30	8,35	»	0,76
*Yonne	0,50	20,00	8.40	5,70	52,05	0.95	2,80	9,60	»	0,55
*Guéthary	»	25,10	8,85	3,05	53,80	1,15	1,15	6,85	»	0,63
*La Valentine. . .	4,45	24,55	10,85	5,20	47,85	1,60	1,60	3.95	»	0,74
*Roquefort. . . .	0,85	27,20	11,05	4,45	48,05	1,40	1,65	5,35	»	0,79
Vassy	»	22,60	8.90	5,30	52,69	1,15	3,25	6,11	»	0,60
Vassy	»	23,50	8,76	5,64	50,68	1.80	4,03	5,25	0,24	0,63
Vassy	6,00	24,80	7,00	4,80	44,12	2,08	3,60	7,50	0,10	0,76
Vassy	»	22.40	9,60	4,76	52,20	1,44	3,84	5,70	0,06	0,61
Isère	»	21,70	8,29	3,71	52,68	3,52	3,56	6,20	0,34	0,56
Isère	»	23.60	7,99	4,31	57.40	1,50	2,10	2,75	0,35	0,55
Isère	»	21,80	10,03	3,77	55,00	2,80	2,74	3,75	0.11	0,57
Pouilly	2,00	26,80	10,39	4,61	46,10	1,72	1,74	6,40	0,24	0,80
Zumaya	10,70	30,80	7,82	5,13	33,04	0,93	2,90	8.20	0,48	1,17

Nota. — Les analyses marquées d'un astérisque sont extraites de la *Chimie appliquée à l'art de l'Ingénieur* de M. Durand Claye ; les autres analyses ont été faites par nous-mêmes.

On voit par ces quelques exemples que la composition des ciments prompts est assez variable ; on remarque que presque tous renferment une dose élevée d'alumine, d'oxyde de fer et d'acide sulfurique ; la magnésie est également en proportion plus grande que dans les chaux et les ciments à prise lente. L'indice d'hydraulicité varie de 0,55 à 0,80, ce n'est que par exception que l'indice dépasse 0,80.

Résistance. — La résistance des mortiers de ciment prompt est assez irrégulière : nous avons réuni dans le tableau nº 20 quelques résultats obtenus avec des ciments prompts de diverses provenances. Les briquettes de mortier ont été comprimées fortement dans les moules.

Les résistances restent pendant longtemps stationnaires, mais on peut remarquer qu'il se produit assez fréquemment une augmentation sensible après plusieurs années. Les mortiers gâchés à l'eau de mer sont plus résistants que les mortiers gâchés

à l'eau douce, pendant les premiers mois surtout ; par la suite ils présentent souvent des résistances moins fortes.

Les mortiers de ciment prompt conservés à l'air durcissent moins bien que dans l'eau ; si l'air est sec ils donnent des résultats peu élevés. Les briquettes de ciment pur conservées à l'air se fendent souvent et se réduisent en morceaux au bout de quelques mois : de même si l'on abandonne à l'air une briquette de ciment pur qui est restée dans l'eau pendant longtemps, on remarque bientôt des fendillements, surtout si la briquette avait été immergée dans l'eau de mer.

Les ciments romains en Russie. — Nous donnons ci-dessous quelques résultats d'analyses et d'expériences éxécutées sur des ciments romains fabriqués en Russie. Nous devons ces renseignements à l'obligeance de M. le Prof. Bélélubsky, Directeur du laboratoire de l'Institut des Ingénieurs des voies de communication à Saint-Pétersbourg.

Composition chimique

Provenance	Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Magnésie	Potasse et soude	Sulfate de chaux	Acide carbonique	Eau
Schmidt	14,72	8,56	2,70	36,74	22,26	1,27	»	10,70	»
Tscherkasoff . . .	24,29	6,53	5,80	42,01	10,15	4,29	1,30	3,18	1,33
Podolsk.	12,57	2,76	1,16	48,20	15,10	»	»	»	»
Rosche	17,00	2,07	8,69	45,00	3,81	1,20	0,10	19,00	2,01

Essais de résistance

Provenance des ciments	Résidu sur le tamis de		Durée de la prise (en minutes)	Quantité d'eau de gâchage		Résistance à la traction ciment pur		Mortier 1 : 3		
								Densité des éprouvettes	Résistance à 28 jours	
	900^m	5000^m		ciment pur	Mortier 1 : 3	7 jours	28 jours		com-pression	traction
Schmidt	»	»	»	»	14	»	»	2,13	31,20	5,73
Liphard.	12	»	150	62	16	»	5,53	2,10	16,86	4,47
Tscherkasoff . . .	17.5	53,9	140	28	10,5	14,0	28,0	2,10	27,5	7.29
Noworossiisk. . .	2,7	»	91	»	12,5	48,0	52,0	»	105,00	13,99
Glouchoosersky . .	7,0	»	100	»	12,5	28,0	31,0	»	26,5	7,49

Renseignements généraux. — Il existe relativement peu d'usines qui produisent le ciment Portland naturel. En France, on trouve quelques usines de ciment Portland naturel dans l'Isère ; il en existe un certain nombre en Autriche et en Russie. Les ciments mixtes se fabriquent surtout dans l'Isère.

Les usines qui fabriquent le ciment prompt sont assez nombreuses en France ; elles se trouvent groupées dans l'Yonne, la Côte-d'Or, l'Isère, les Bouches-du-Rône, le Lot-et-Garonne et la Dordogne ; ce sont les usines de l'Yonne et de l'Isère qui en produisent les plus grandes quantités.

Voici les principales usines :

Yonne. — Région de Vassy. — Dumarcet à Provency ; Millot à Marcy et Sainte-Colombe ; Joudrier et Cie ; Prévost ; Bougault.

Côte-d'Or. — Landry à Venaray ; Journault à Marigny-le-Cahouët ; Détang à Pouilly.

Isère. — Société Delune et Cie à Grenoble ; Thorrand et Cie à Voreppe ; Vicat et Cie usine d'Uriage ; Guingat et Cie à Grenoble ; Berthelot à Vif.

Bouches-du-Rhône. — A. Armand et Cie ; Rastoin frères ; Romain-Boyer. } Usines à la Bédoule.

Dordogne. — Société d'Allas à Allas.

Lot-et-Garonne. — Gipoulou à Sauveterre-la-Lémance.

En France, les ciments prompts les plus estimés sont ceux de l'Isère.

La fabrication du ciment prompt existe toujours en Angleterre, mais elle est très restreinte ; en Espagne, on trouve un certain nombre d'usines à Zumaya, près de St-Sébastien ; en Italie, les usines de Casale et de Bergame produisent des quantités assez importantes de ciments prompts. Les pays où l'on fabrique encore le ciment romain sont la Suisse, l'Autriche et la Russie.

Aux Etats-Unis, il existe aussi un grand nombre d'usines produisant des ciments romains dont le plus connu est celui de Rosendale.

Voici d'après le « vol. 5 du *Mineral Industry*, New-York

1897 » le tableau de la production du ciment naturel aux États-Unis :

États	1895			1896		
	Barils	Valeur à l'usine		Barils	Valeur à l'usine	
		totale	par baril		totale	par baril
		$	$		$	$
Illinois	216,010	75,604	0,35	246,755	86,364	0,34
Indiana et Keintuchy .	1,701,023	597,091	35	1,434,337	604,049	35
Kansas	188,000	121,340	65	171,017	109,747	64
Maryland.	144,450	74,993	52	188,050	95,846	51
Minnesota	90,687	37,291	41	53,098	26,591	50
New-York, Ulster . . .	3,230,051	2,422,538	75	3,577,594	2,510,393	70
New-York, Onondaga .	259,843	141,120	54	94,816	47,881	50
New-York, Schoharie .	31,980	23,804	74	28,465	20,898	73
New-York, Erie . , .	970,427	618,577	64	955,970	553,027	57
Ohio	39,401	36,024	91	32,319	24,735	76
Pensylvanie.	400,998	233,713	58	312,041	185,397	59
Virgine	1,600	1,440	90	3,749	2,249	60
Wisconsin	419.583	213,750	51	356,400	178,200	50
		$	$		$	$
Total (barils)	7,694,053	4,597,285	0,58	7,454,611	4,353,377	0,57
Total (tonnes)	1,047,006	par tonne	4,39	1,014,424	par tonne	4,29

Comme on le voit, la production des ciments naturels en Amérique est très grande.

Les principaux centres de production sont les usines de Rosendale, dans l'état de New-York, les usines du vallon Lehigh, en Pensylvanie, les usines de la rivière Potomac à Cumberland et Hancock en Maryland, les usines Louisville en Kentucky et quelques autres usines en Wisconsin.

Tous ces ciments appartiennent à la catégorie des ciments romains produits par la calcination à basse température de calcaires argileux. Ces ciments se distinguent par une teneur quelquefois très élevée en magnésie ; dans les ciments de Rosendale notamment la magnésie et la chaux se trouvent à peu près en quantités égales (1).

(1) Nous devons également ces renseignements à M. F. H. Lewis.

5. Pouzzolanes-Trass. — Les pouzzolanes sont des matières d'origine volcanique qui se trouvent en masses considérables dans certaines régions et dont les propriétés hydrauliques sont connues depuis fort longtemps. La pouzzolane d'Italie est la plus renommée ; les Romains l'utilisaient dans tous leurs grands travaux ; Vitruve en parle en ces termes : « Il est une espèce de poudre qui effectue naturellement des choses admirables ; elle se trouve dans le pays de Baïe et sur le territoire des villes privilégiées situées autour du mont Vésuve ; mêlée avec de la chaux et de la blocaille, elle contribue non seulement à la solidité des édifices ordinaires mais elle fait durcir sous l'eau les môles que l'on construit à la mer. » (Vitruv. archit., lib. II, cap. 6) (1).

Vicat a fait des pouzzalones une étude très approfondie et s'est attaché à obtenir des pouzzolanes artificielles par la torréfaction d'argile de composition convenable. Ses essais ont été couronnés de succès et la fabrication de la pouzzolane aurait peut-être pris un certain développement, mais les usines de chaux hydrauliques et de ciment se multiplièrent et les pouzzolanes artificielles furent délaissées pour des produits plus sûrs et moins coûteux.

Les pouzzolanes d'Italie proviennent de Bacoli, près de Naples, ou de Saint-Paul, près de Rome ; les premières sont employées de préférence pour les travaux à la mer.

La pouzzolane de Bacoli est extraite à 4 mètres de profondeur ; sa couleur est jaune verdâtre ; le poids du mètre cube est de 1 000 kilogrammes.

La pouzzolane de Rome est rouge foncé ; le poids du mètre cube atteint 1 190 kilogrammes.

Dans le nord, le trass d'Andernach est l'objet d'une exploitation importante comme pouzzolane. On le rencontre en masses dures et compactes dans la vallée de la Nette, près d'Andernach, à 10 kilomètres en aval de Coblentz ; dans la vallée de Brohl, qui se trouve à quelques kilomètres au sud, le trass se présente

(1) *Nouvelle étude sur les pouzzolanes artificielles comparées à la pouzzolane d'Italie dans leur emploi en eau douce et en eau de mer*, par J. L. Vicat. Paris, Dunod, 1846.

en poudre dans laquelle on rencontre de faibles quantités de trass compact. On appelle ce trass cendres de tuf ou encore trass sauvage.

Le trass de la vallée de la Nette a une valeur beaucoup plus grande que celui de Brohl ; comme il est difficile de juger de la qualité d'un trass quand il est réduit en poudre, on achète généralement le trass en pierre et on le fait moudre sur le chantier ; ou bien des agents de l'administration surveillent la mouture sur les lieux d'extraction.

Le trass en pierre se trouve en bancs puissants de 10 à 12 mètres d'épaisseur ; le découvert est de 7 à 8 mètres.

Quand le trass vient d'être extrait, il contient une grande quantité d'eau ; on le met en tas et il reste à l'air pendant plusieurs semaines ; comme il est très poreux il finit par se dessécher presque complètement.

Analyses de quelques pouzzolanes d'après Vicat

Désignation des pouzzolanes	Chaux	Carbonate de chaux	Magnésie	Carbonate de magnésie	Matières inertes	Silice	Alumine	Peroxyde de fer
Pouzzolane de Saint-Paul	8,80	»	4,70	»	»	45,00	14,80	12,00
— de Naples (brune) . .	8,96	»	»	»	20,00	24,50	15,75	16,30
— — (grise) . .	9,47	»	4,40	»	2,50	42,00	15,50	12,50
— — (grise dite de feu)	»	19,67	»	6,83	7,30	33,67	14,73	9,46
— brune de Bessan (Hérault).	8,70	»	»	»	4,50	38,50	18,35	14,90
Trass d'Andernach	3,00	»	»	»	»	46.60	20,60	12,00
—	2,33	»	1,00	»	8,57	46,25	20,71	5,58

Nous empruntons les renseignements suivants au mémoire présenté par M. Dardenne, Ingénieur des Ponts et Chaussées, à la Commission des méthodes d'essais :

DOSAGES ADOPTÉS SUR LES CHANTIERS POUR LES MORTIERS DE CHAUX ET POUZZOLANES

La détermination des dosages à adopter pour les mortiers d'essai présente un intérêt tout spécial, puisque les propriétés

hydrauliques des mortiers en dépendent directement, ainsi que leur résistance à l'action de l'eau de mer.

Avant d'aborder l'examen détaillé des méthodes d'essai, nous croyons donc utile de résumer sommairement les indications que nous avons pu recueillir sur les dosages communément adoptés sur les chantiers, tant en France qu'à l'étranger.

1° *Trass.* — Les mortiers employés à *Dunkerque* et à *Calais*, il y a quarante ou cinquante ans, étaient composés de 45 de chaux moyennement hydraulique, 50 à 70 de pouzzolanes (dont 20 de trass, et le reste en pouzzolane artificielle, dite ciment de Calais), et 30 à 50 de sable. A partir du moment où l'on a renoncé à l'emploi de la pouzzolane artificielle, on a adopté des dosages divers, contenant tous 2 de chaux, 1 de trass, avec une quantité variable de sable (celui-ci étant, dans certains cas, remplacé par de la cendre de houille). On n'a, d'ailleurs, conservé les mortiers de chaux et trass que pour le béton des massifs de fondation, le ciment étant exclusivement employé pour l'ensemble des autres maçonneries. Les dosages actuellement admis sont les suivants :

Trass	2,5	3	3,5
Chaux éminement hydraulique	5	6	7
Sable	6,5	5	3,5

Les dosages les plus riches en trass conviennent de préférence pour les maçonneries exposées plus directement à l'action de l'eau de mer.

En *Belgique*, on prescrit communément les deux dosages suivants, dont le dernier est presque exclusivement employé tant pour les travaux à la mer que pour les massifs de fondation des ouvrages de navigation intérieure.

Trass	2	4
Chaux hydraulique ordinaire	6	6
Sable	4	2 ou 0

En *Hollande*, les dosages généralement adoptés se ramènent aux types suivants :

Steenkalk	Trass	2	—	2	—	2	—
	Chaux	6	—	4	—	3	—
	Sable	4	—	2	—	—	—
Schelpkalk	Trass	—	2	—	2	—	2
	Chaux	—	6	—	4	—	2
	Sable	—	3,5	—	1	—	—

Le dernier dosage a été adopté en particulier pour les maçonneries des bajoyers de la nouvelle écluse d'Ymuiden, au débouché du canal d'Amsterdam à la mer du Nord ; on l'emploie, en général, pour tous les travaux à la mer de quelque importance. Pour le béton de fondation de la même écluse, le mortier comportait 7 de trass, 6 de chaux hydraulique en poudre, 5 de rivière et 17 de pierres cassées.

Nous n'avons pas recueilli de renseignements certains sur les dosages adoptés en *Allemagne* pour les travaux à la mer. Pour les travaux de navigation intérieure, la majeure partie des dosages communément admis paraissent se rapporter à un dosage type comprenant 1 volume de chaux hydraulique pour 2 de trass et sable, la proportion relative du trass et du sable variant suivant qu'il s'agit de maçonneries destinées à demeurer constamment sous l'eau, ou de bétonnages. Nous citerons en particulier les trois dosages suivants employés pour les quais du port de Brême et pour les travaux de canalisation du Mein.

Trass	2	3	4
Chaux hydraulique	3	3	3
Sable	4	3	2

Tous les dosages que nous venons d'énumérer sont volumétriques. Pour les exprimer en poids, il faudrait connaître la densité des chaux, qui varie suivant leur nature et leur hydraulicité ; on peut admettre, pour les chaux grasses ou faiblement

hydrauliques, un poids moyen de 500 kilogrammes par mètre cube ; le poids du trass est d'environ 1 000 kilogrammes. Le dosage comportant 3 volumes de trass pour 3 de chaux grasse serait donc sensiblement équivalent à un dosage en poids comportant 2 parties de trass pour 1 partie de chaux (1). Un mortier de chaux, trass et sable normal, tiercé par parties égales en volume, correspond de même à un dosage en poids comportant 2 de trass, 1 de chaux grasse et 3 de sable. Ces deux dosages en poids sont, comme nous le verrons, ceux que l'on adopte en Allemagne pour les essais du trass.

2° *Pouzzolanes d'Italie.* — En *Italie*, d'après les renseignements fournis par M. Luiggi à M. le baron Quinette de Rochemont, inspecteur général des Ponts et Chaussées, on emploie trois types de mortiers hydrauliques, savoir :

Pouzzolane de Rome ou de Bacoli	1	2	3
Chaux en pâte	1	1	2
Sable	1	—	—

Pour les mortiers à employer sous l'eau, on emploie de préférence la pouzzolane de Bacoli (densité 950 à 1 000) et le dosage de 2 pour 1 ; au port de Gênes, en particulier, on emploie exclusivement cette pouzzolane, que l'on mélange à des chaux magnésiennes ; cependant, on a cru remarquer qu'elle se combine mieux avec les chaux grasses qu'avec les chaux magnésiennes ou moyennement hydrauliques. La pouzzolane de Bacoli donne une prise plus lente que la pouzzolane de Rome ; mais, avec le temps, les mortiers acquièrent une résistance plus grande.

Pour les ouvrages où une prise plus prompte est utile et notamment pour les mortiers destinés à des travaux exécutés en dehors de l'eau, l'emploi de la pouzzolane de Rome (densité 1 190) donne de meilleurs résultats. Les mortiers sont, en

(1) Notons, en passant, que, lorsqu'il s'agit de mortier de chaux grasse, on peut regarder comme très comparables le dosage comportant 3 volumes de chaux éteinte en poudre, et le dosage comportant 3 volumes de trass pour 2 volumes de chaux en pâte.

général, dosés à raison de 1 de pouzzolane pour 1 de chaux en pâte et 1 de sable de mer ; quand on emploie des chaux grasses ou très peu hydrauliques, il peut y avoir intérêt à forcer la teneur en pouzzolane ; on va même quelquefois jusqu'à un dosage de 3 de pouzzolane pour 1 de chaux ; toutefois, pour la maçonnerie de moellons, on s'en tient généralement au dosage de 1 volume de pouzzolane de Rome pour 1 de chaux grasse et 1 de sable de mer.

Il n'est pas sans intérêt de signaler que les deux dosages principaux encore en usage en Italie ne sont pas autres que ceux qui étaient employés il y a cinquante ans pour les travaux de Toulon et pour la construction du port d'Alger, et que mentionne un mémoire inséré par Vicat dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (1849, 2e semestre). Dans ce mémoire, Vicat rappelait d'ailleurs que, d'après Vitruve, les mortiers employés par les Romains, pour la construction des môles et les travaux à la mer, étaient également dosés à raison de 2 de pouzzolane pour 1 de chaux.

Comparaison des divers dosages. — Si l'on compare les divers dosages énumérés ci-dessus et que l'on s'en tienne, pour chacune des séries, aux dosages les plus riches en pouzzolanes, mortiers que l'on doit considérer comme particulièrement propres aux travaux à la mer, on se rend compte qu'en fait les divergences sont moins marquées qu'on ne serait tenté de le croire de prime abord.

Seul, le mortier riche en usage à Dunkerque est caractérisé par une proportion double de chaux (en volume). Tous les autres, abstraction faite du sable, se rapprochent d'un même dosage type que l'on peut à volonté définir comme suit :

3 volumes de pouzzolane pour 3 de chaux en poudre ;

2 parties en poids de pouzzolane pour 1 de chaux de poudre ;

3 volumes de pouzzolane pour 2 de chaux en pâte.

CHAPITRE IV

—

ESSAIS DES PRODUITS HYDRAULIQUES

Depuis quelques années les essais des chaux et des ciments ont été l'objet de discussions nombreuses et de recherches très intéressantes. La conférence instituée par Bauschinger et qui s'est réunie à Munich, Dresde, Berlin, Vienne, Zurich et en dernier lieu à Stockholm, avait pour but de réaliser l'uniformité des méthodes d'essais; en 1889 le Congrès international des procédés généraux de construction émettait le vœu de voir déterminer des règles uniformes pour le contrôle et la réception des chaux et des ciments. Enfin en 1891 le Ministre des Travaux Publics institua une Commission des méthodes d'essais des matériaux de construction dont la mission était « de formuler les règles uniformes à adopter dans l'essai des matériaux de construction et de déterminer les unités à prendre comme terme de comparaison. »

Les travaux de cette Commission ont eu pour principal résultat de donner à tous ceux qui s'occupent de ces questions une quantité considérable de documents dont la plupart présentent un grand intérêt. La Commission, contrairement à ce que l'on pouvait espérer, n'a pas cru devoir indiquer des règles uniformes pour la réception des chaux et des ciments; elle n'a pas voulu non plus indiquer ce qui peut, dans l'état actuel de nos connaissances, caractériser les bons produits et ce qui doit les différencier les uns des autres. Elle s'est bornée à passer en revue les divers essais que l'on fait généralement et à fixer les règles à suivre pour exécuter ces essais quand on voudra y avoir recours.

Réduite à ce rôle modeste, la Commission a eu cependant une grande utilité ; elle a provoqué des recherches et des études sur des questions encore peu connues, et en décrivant minutieusement la manière d'exécuter les divers essais elle a rendu service à tous ceux qui veulent se rendre compte de la valeur des produits qu'ils emploient.

L'utilité des essais eux-mêmes a été souvent contestée et il n'est pas rare de voir formuler l'opinion qu'il est impossible de juger un produit à l'aide des essais de réception employés généralement. Ces idées erronées proviennent de ce que l'on a compliqué les essais et qu'on ne s'est pas inquiété de savoir s'ils étaient tous bien justifiés.

L'absence de méthode uniforme a contribué aussi à entretenir cette défiance de beaucoup de constructeurs au sujet des essais de réception ; les résultats obtenus dans des laboratoires différents étaient généralement très dissemblables et il paraissait, en effet, assez difficile de s'entendre sur ce que l'on devait considérer comme donnant une idée exacte de la valeur d'un produit. Toutes ces causes d'erreurs ont maintenant disparu ; il existe une concordance suffisante entre les résultats des laboratoires d'essais, et tous ceux qui veulent faire des expériences sur les ciments et les chaux sont guidés par des règles précises.

Dans ces conditions il est toujours facile de se rendre compte de la qualité d'un produit et cela avec un petit nombre d'expériences. Il faut, bien entendu, demander à ces essais uniquement des termes de comparaison et, sauf en ce qui concerne la prise, on ne doit pas y chercher des indications pour l'emploi pratique ; dans cet ordre d'idées les expériences doivent être faites d'une toute autre façon et elles peuvent varier à l'infini.

Les principales expériences sur les chaux et les ciments sont les suivantes :

L'examen de la composition chimique (analyse) et de l'homogénéité (examen à la loupe).

Détermination de la densité ou poids spécifique, de la densité apparente, de la finesse de mouture, du temps de prise, de la résistance à la traction et à la compression ; enfin essais à chaud pour déterminer la constance de volume.

Tous ces essais sont généralement exécutés dans les laboratoires possédant une installation complète; mais on peut se borner à quelques-uns d'entre eux seulement et s'en tenir, par exemple, aux expériences relatives à la densité apparente, à la finesse, à la prise, à la résistance à la traction. Avec un peu de pratique des essais on arrivera, avec ces quelques éléments très simples, à apprécier sûrement la valeur d'un produit.

Analyse. — L'analyse d'un calcaire, d'une chaux ou d'un ciment se fait de la manière suivante :

On pulvérise finement l'échantillon à analyser; la poudre doit passer complètement au tamis de 900 mailles par centimètre carré (n° 80). On pèse 1 gramme de la matière que l'on place dans une capsule en porcelaine; on ajoute quelques gouttes d'eau distillée pour humecter la poudre, puis on verse 10 à 15 centimètres cubes d'acide chlorhydrique pur étendu d'eau à moitié ; dans le cas où la proportion d'acide carbonique est assez élevée, on doit verser l'acide chlorhydrique avec précaution. On active l'attaque par l'acide en chauffant légèrement la capsule. Quand tout est dissous, on porte la capsule au bain de sable ou au bain-marie et on évapore à siccité. Le résidu sec est humecté avec quelques gouttes d'acide chlorhydrique pur puis on étend d'eau bouillante; tout se dissout excepté la silice que l'on recueille sur un filtre; celle-ci, après lavage, est séchée, calcinée et pesée.

Dans le liquide filtré, que l'on chauffe jusqu'à commencement d'ébullition, on verse de l'ammoniaque de manière à rendre la liqueur très légèrement alcaline, ce que l'on reconnaît à l'odeur persistante d'ammoniaque ou bien à l'aide du papier de tournesol; l'alumine et le fer sont précipités; on les recueille sur un filtre, on lave, on calcine et on pèse l'alumine et l'oxyde de fer; ceux-ci sont redissous dans de l'acide chlorhydrique pur; quand tout le fer est dissous on étend d'eau, puis on introduit dans le flacon du zinc pur en grenaille ; le peroxyde de fer est réduit et il se transforme en protoxyde de fer ; la réduction une fois terminée, on filtre et dans le liquide filtré on oxyde de nouveau le fer à l'aide d'une liqueur titrée de perman-

ganate de potasse (on doit éviter d'employer une trop grande quantité d'acide pour dissoudre le fer).

Dans le liquide recueilli à la suite de la filtration de l'alumine et du fer, on verse de l'oxalate d'ammoniaque et la chaux est précipitée ; on chauffe et on filtre ; le précipité est lavé, séché et calciné au rouge sombre ; on pèse la chaux à l'état de carbonate ; ou bien on calcine au rouge blanc et on a la chaux à l'état de chaux caustique.

Dans le liquide filtré on précipite la magnésie par le phosphate de soude ; on verse d'abord quelques centimètres cubes d'ammoniaque puis une égale quantité de phosphate de soude ; on agite pendant quelque temps et on laisse le tout en repos pendant 12 heures, après quoi on filtre et on recueille du phosphate ammoniaco-magnésien. Le précipité est lavé avec de l'eau ammoniaquée, puis il est séché et calciné ; on pèse du pyrophosphate de magnésie PhO^5, 3MgO ; en multipliant le poids trouvé par 0,360 on a la magnésie.

Pour doser l'acide sulfurique on opère sur une autre prise d'échantillon ; on pèse 2 grammes que l'on traite comme précédemment jusqu'à l'élimination de la silice ; on précipite alors l'acide sulfurique par le chlorure de baryum ; on laisse le tout au bain-marie pendant une heure ou deux et on filtre. Le précipité de sulfate de baryte est lavé et calciné ; en multipliant le résultat trouvé par 0,334 on a l'acide sulfurique.

L'eau se détermine sur 2 grammes ; on les place dans une capsule en platine et on laisse celle-ci à l'étuve à 100-120° pendant deux heures environ. La différence de poids indique l'eau non combinée ; on porte ensuite la capsule au moufle où on la maintient à la température du rouge vif pendant une heure ; en pesant de nouveau on constate une nouvelle perte qui représente l'eau combinée et l'acide carbonique (ainsi que les matières organiques ; mais leur proportion est presque toujours assez faible pour qu'on puisse la négliger).

L'acide carbonique est déterminé par ailleurs sur 1 gramme, à l'aide d'un des nombreux appareils avec lesquels on peut opérer ce dosage.

Enfin la silice recueillie sur les 2 grammes qui ont servi au

dosage de l'acide sulfurique est utilisée pour doser le sable. Une fois que la silice a été lavée, on verse sur le filtre de la lessive de potasse qui dissout rapidement la silice et ne laisse que le sable ; on lave assez longtemps à l'eau distillée et après séchage et calcination on a la proportion du résidu sableux.

Quand on a des doutes sur la pureté d'un ciment, on peut opérer l'analyse de la façon suivante : on sépare la poudre fine du résidu à l'aide du tamis de 4 900 mailles, et on analyse séparément les deux échantillons obtenus. Si les résultats sont à peu près identiques, il est très probable que le ciment n'a pas été falsifié. Si, au contraire, les proportions des éléments trouvés sont différents dans les deux échantillons, on peut être assuré que le ciment a été additionné d'une matière étrangère. Voici un exemple d'une pareille expérience exécutée sur un ciment dans lequel on soupçonnait la présence de laitier de haut-fourneau.

	Poussière fine passant à travers le tamis de 4 900 m.	Résidu restant sur le tamis de 4 900 m.
Silice	27,10	31,00
Alumine	4,70	8,08
Oxyde de fer	3,30	3,92
Chaux	60,25	53,87
Magnésie	0,97	0,93
Acide sulfurique	1,10	1,02
Perte au feu	2,50	1,25
Non dosé	0,08	»
	100,00	100,07

Ces deux analyses ne permettaient pas de mettre en doute la falsification.

Il est rare, en effet, qu'une matière étrangère ajoutée au ciment au moment de la mouture se répartisse en égale proportion dans la poudre fine et dans le résidu. Si cette matière est très dure, comme c'est le cas pour le laitier, la plus grande partie reste dans le résidu ; si elle est très tendre, comme le carbonate de chaux, l'argile, etc., elle se trouve presqu'en totalité dans la poussière fine.

La falsification la plus usitée consiste, comme nous l'avons dit, à additionner le ciment de laitier de haut-fourneau, surtout de laitier vitrifié et refroidi lentement ; sa couleur se rapproche alors de celle du ciment. Certaines usines livrent sous le nom

de ciment Portland des produits qui ne sont qu'un mélange d'incuits et de laitier; la vente d'une pareille marchandise, qui n'a rien de commun avec le Portland, constitue une fraude évidente contre laquelle les fabricants consciencieux ne sauraient trop protester (1).

La présence du laitier peut être décelée également par l'odeur d'hydrogène sulfuré qui se dégage du ciment quand on l'attaque par l'acide chlorhydrique. Mais ce moyen n'est pas toujours sûr et ne peut donner que des indications assez vagues.

Essais d'homogénéité. — 1° *Examen à la loupe.* — Quand on veut examiner un ciment ou une chaux à la loupe il faut d'abord les débarrasser de la fine poussière qui ne permettrait pas de distinguer nettement les grains. Le résidu restant sur le tamis de 4 900 mailles se prête très bien à l'examen à la loupe. Quand un ciment est homogène les grains sont noirs, mats, à angles un peu arrondis; quelques grains ont une teinte brune, mais l'ensemble est franchement noir. On reconnaît facilement les grains de charbon à leur couleur beaucoup plus noire et à leur éclat plus brillant; les grains de silex sont blancs et ont l'aspect de sable; dans tous les ciments, même quand la fabrication est soignée, on constate la présence de ces matières et aussi parfois de petits fragments de fer ou de fonte provenant des appareils de broyage. Mais la proportion de ces matières étrangères est toujours très faible et peut être négligée.

La présence du laitier de haut-fourneau peut être décelée par l'examen à la loupe; quand le laitier ajouté au ciment est constitué en grande partie par des morceaux à teinte bleuâtre on les reconnaît facilement dans le ciment; ces grains sont aussi plus lisses que les grains de ciment et ils ont un éclat plus vif; il en est de même avec les laitiers noirs dont l'aspect se rapproche de celui des grains de charbon.

(1) Les fabricants de ciments allemands ont donné à cet égard un exemple qui devrait bien être imité; lorsque que quelques-uns d'entre eux voulurent mélanger au ciment des proportions plus ou moins grandes de laitier, sous prétexte d'améliorer la qualité du ciment, l'association des fabricants décida d'exclure tous ceux qui livreraient de pareils produits sans indiquer d'une manière très apparente la teneur du ciment en laitier.

L'addition de sulfate de chaux au ciment après la cuisson se reconnaît encore assez facilement par l'examen du résidu restant sur le tamis de 4 900 mailles ; au milieu des grains noirs du ciment scorifié, les grains blancs et cristallins du gypse apparaissent nettement, même si la quantité de sulfate ajoutée au ciment ne dépasse pas 1 %.

Enfin les débris de briques, les pierres, etc., peuvent être reconnus facilement par l'examen à la loupe.

A la suite d'un rapport de M. Feret, la Commission des méthodes d'essais a adopté les conclusions suivantes :

a) La loupe peut être utilement employée pour donner des indications sur le degré d'homogénéité des ciments.

b) Il convient de faire les observations sur la matière retenue par le tamis de 4900 mailles en opérant successivement avec des grossissements d'environ trois diamètres, pour l'examen d'ensemble, et huit pour l'examen de détail.

c) Si l'examen révèle la présence de grains qu'on puisse soupçonner provenir de matières étrangères au ciment, on en vérifiera la nature, soit par l'analyse chimique complète ou partielle du produit brut ou fractionné, soit par tout autre moyen qu'on jugerait plus propre à mettre ces matières étrangères en évidence (1).

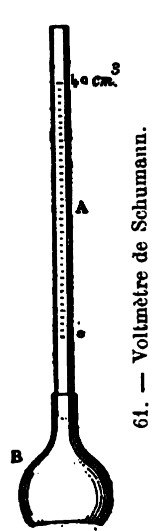
2° *Essai à l'iodure de méthylène.* — L'examen à la loupe ne peut donner qu'une présomption sur l'addition de matières étrangères au ciment ; mais il peut ne pas renseigner sur la proportion de ces matières. M. Le Chatelier a proposé de séparer les matières étrangères du ciment au moyen de l'iodure de méthylène. Ce liquide peut être amené à une densité de 2,93 qui est inférieure à celle du ciment et supérieure à celle des matières que l'on peut employer pour le falsifier.

En agitant une petite quantité de poudre dans une solution d'iodure de méthylène et en laissant reposer, le ciment tombe au fond de l'éprouvette tandis que les matières étrangères surnagent et on peut ainsi facilement en apprécier la quantité.

(1) Voir le rapport de M. Feret sur l'application de la loupe au contrôle des ciments.

Poids spécifique. — Il existe un grand nombre d'appareils pour déterminer le poids spécifique des chaux et des ciments ; nous nous bornerons à citer ceux de Mann, de Keate, de Schumann.

Le volumètre de Schumann (*fig.* 61) est employé couramment en Allemagne, en Suisse, en Belgique, etc., où on le trouve dans tous les laboratoires d'essais de matériaux hydrauliques. Il se compose d'un tube gradué A fixé par un ajutage à l'émeri sur un flacon B. Le tube est divisé en dixièmes de centimètre cube et la capacité graduée est de 40 centimètres cubes. L'expérience se fait de la manière suivante : le tube étant fixé sur le flacon, on remplit celui-ci de benzine jusqu'aux premières divisions ; on attend quelques instants et on note la division à laquelle s'est fixée la benzine. On pèse 100 grammes de ciment ou de chaux que l'on introduit avec précaution dans l'appareil, et quand toute la poudre a été versée, on lit la division correspondant au niveau atteint par le liquide dans le tube gradué ; la différence avec le chiffre observé précédemment donne le volume occupé par les 100 grammes d'agglomérant.

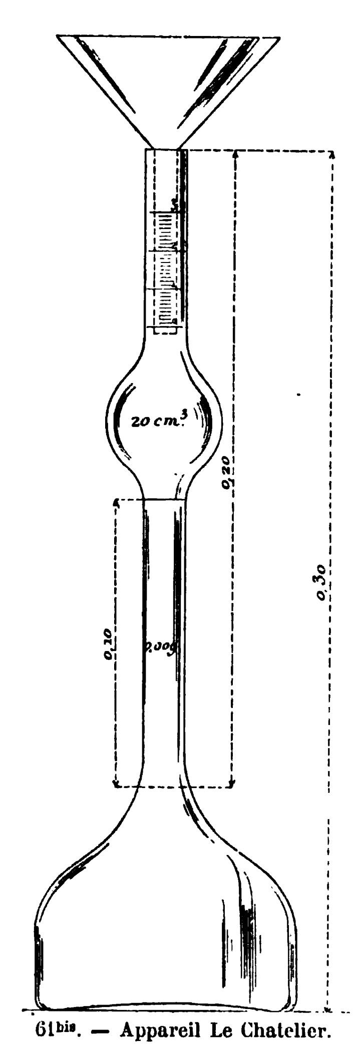


61. — Volmètre de Schumann.

L'appareil de Schumann donne des résultats satisfaisants ; on peut le plonger dans l'eau avant d'introduire la poudre et quand l'opération est terminée ; il reste peu de bulles d'air dans le flacon parce qu'elles ont été expulsées au fur et à mesure que l'on a versé la poudre qui a dû traverser une hauteur de plus en plus grande de benzine. Mais il faut un temps très long pour faire un essai et on doit prendre de très grandes précautions pour le mener à bonne fin ; la poudre se colle et s'agglomère sur les parois du tube qu'elle bouche complètement dès que l'on verse un peu trop vite ; il faut alors imprimer au flacon de légères secousses jusqu'à ce que l'on soit parvenu à faire descendre la poudre.

MM. Le Chatelier et Candlot, chargés par le sous-comité de la Commission des méthodes d'essais de rechercher quel était l'appareil le plus exact et le plus commode, en ont réalisé un

qui présente les dispositions suivantes (*fig.* 61bis) : une fiole de 120 centimètres cubes de capacité environ est surmontée d'un col étroit de 20 centimètres de longueur ; à la partie supérieure existe un renflement d'une capacité de 20 centimètres cubes; un trait est gravé au dessous du renflement et un autre immédiatement au-dessus; le volume entre ces deux traits est très exactement de 20 centimètres cubes. A partir du trait supérieur le col est gradué de 0 à 3 centimètres cubes par 1/10 de centimètre cube. Le diamètre du col est de 0,009 environ. La longueur du col entre la fiole et le renflement doit être de 10 centimètres.



61bis. — Appareil Le Chatelier.

Pour déterminer la densité d'une poudre à l'aide de cet appareil, on peut opérer de deux façons :

1° On remplit la fiole de benzine jusqu'au trait inférieur, puis, après avoir pesé exactement 64 grammes de poudre, on introduit celle-ci dans la fiole à l'aide d'un entonnoir ; la tige de l'entonnoir descend dans le col de l'appareil jusqu'à quelques millimètres au-dessus du premier trait ; de cette façon, la poudre en tombant ne peut pas s'agglomérer sur les parois du col et l'obstruer ; d'autre part, les deux traits étant très voisins du renflement, il n'y a jamais à craindre que l'introduction de la poudre dans la fiole soit arrêtée par suite d'une obstruction du tube au-dessus de la benzine, comme cela se produit avec le volumètre de Schumann.

Quand le niveau de la benzine approche du trait supérieur, on verse la poudre avec précaution et par très petites quantités à la fois, on con-

tinue jusqu'à ce que l'on ait obtenu l'affleurement ; on pèse ce qui reste de poudre ; le poids trouvé est retranché des 64 grammes, et la différence représente le poids de poudre contenu dans 20 cm³ ; en divisant ce poids par 20, on a la densité de l'agglomérant.

2° L'opération s'exécute de la même manière que précédemment, mais, au lieu d'arrêter de verser la poudre quand la benzine affleure au trait supérieur du col, on l'introduit en totalité dans l'appareil ; le niveau de la benzine atteint une des divisions comprises entre 0 et 3 cm³, on a ainsi un poids de poudre dans 20 cm³ + *n* 1/10 de centimètre cube et on divise ce poids par le volume observé.

Avec la première manière d'opérer, on peut toujours prendre 64 grammes de poudre, quel que soit l'agglomérant à essayer ; dans le second cas, on doit prendre un poids différent selon la densité probable du produit. Avec les ciments Portland dont la densité est supérieure à 3,0, on prendra 64 grammes ; avec les ciments naturels, les ciments de grappier et les ciments de laitier, ce sera 60 grammes, et enfin 57 grammes seulement pour les produits dont la densité est inférieure à 2,7.

Pendant toute l'opération, on maintient la fiole dans l'eau ; il ne reste à l'air que la partie supérieure ; les erreurs dues aux variations de température sont ainsi complètement évitées.

L'affleurement de la benzine aux traits gravés sur le col de la fiole doit se faire avec toute la précision nécessaire ; il faut que le ménisque soit bien exactement tangent au trait, et, pour s'en assurer, on doit placer la fiole verticalement à hauteur de l'œil, et derrière le trait on placera un papier noir et blanc permettant de distinguer très nettement le ménisque.

Les bulles d'air sont expulsées complètement sans que l'on ait à toucher l'appareil ; grâce à la longueur du col, la poudre doit traverser une grande hauteur de benzine ; elle se divise et abandonne les bulles d'air qu'elle a pu entraîner.

Pour déterminer le poids spécifique des ciments et des chaux, on pourra employer l'une des méthodes actuellement en usage, pourvu qu'elle permette d'obtenir la première décimale avec certitude et la deuxième avec une approximation de deux unités de cet ordre.

Les précautions à prendre dans l'exécution de l'expérience sont les suivantes :

1° On s'assurera que le ciment ou la chaux est bien franchement pulvérulent ; les parties agglomérées par l'humidité, qui seraient retenues par le tamis de 900 mailles par centimètre carré, seront réduites en poudre, passées à ce tamis et mélangées intimement avec la totalité de l'échantillon sur lequel on doit faire l'essai ;

2° Le liquide dont on se servira sera la benzine ou l'essence minérale ;

3° La température devra rester constante pendant toute la durée de l'opération ; elle ne devra pas être supérieure à 15 degrés ;

4° On exécutera sur la poudre à essayer deux ou plusieurs essais jusqu'à ce que l'on ait obtenu des résultats concordants.

Densité apparente. — Quand on détermine la densité apparente d'une chaux ou d'un ciment, on se sert toujours d'une mesure de un litre ; si, par hasard, on employait une autre mesure, il faudrait avoir soin de l'indiquer très clairement car les résultats varient beaucoup suivant la capacité de la mesure.

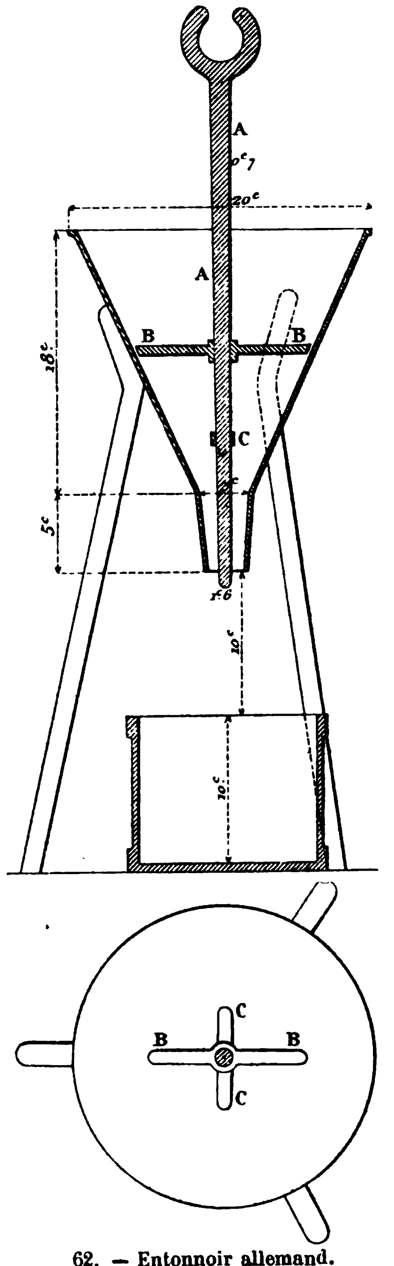
Les appareils le plus employés pour déterminer la densité apparente sont : l'entonnoir normal allemand recommandé par les conférences de Munich, Dresde, et Berlin, le plan incliné adopté par MM. Guillain et Vétillart. La Commission des méthodes d'essais a étudié un autre type d'appareil qui présente l'avantage de pouvoir être utilisé pour tous les agglomérants (tandis que les deux premiers ne conviennent bien que pour les ciments) ; il est d'un maniement très simple et nous pensons qu'il doit être recommandé de préférence à tout autre.

Voici la description de ces trois appareils, d'après le rapport de M. Alexandre.

Entonnoir normal Allemand (*fig.* 62). — Cet appareil se compose d'un entonnoir porté par trois pieds qui l'élèvent à 10 centimètres au-dessus de la mesure à remplir. On facilite l'écoulement de la poudre en faisant mouvoir au centre, une tringle (A) en fer, guidée par deux tiges (B, C) disposées en croix. Dans les expériences auxquelles le Comité a fait procéder, on a admis que le remplissage doit être arrêté, quand il s'est formé au-dessus

de la mesure un cône ayant le bord circulaire pour base, et que le dérasement doit être effectué en faisant glisser sur ce bord une lame tenue dans un plan bien vertical.

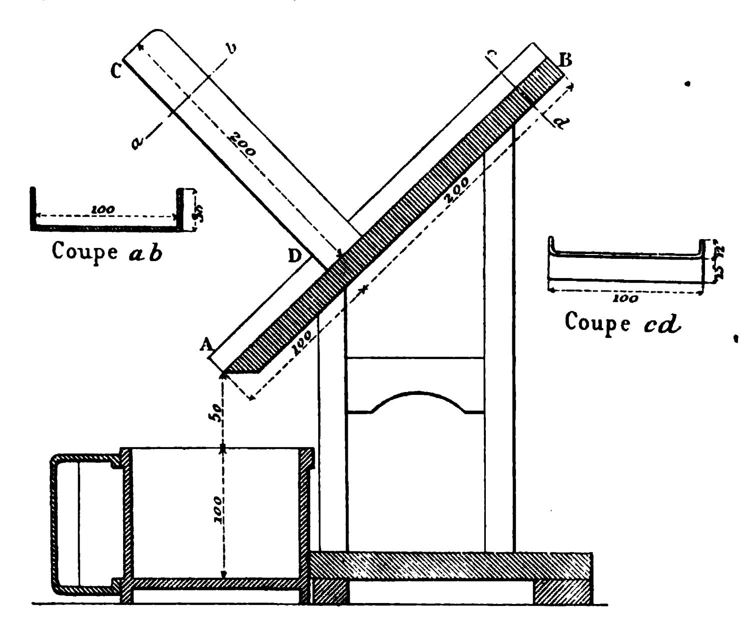
Plan incliné (fig. 63). — Cet appareil, qu'on emploie couramment en France depuis que le cahier des charges des fournitures de ciment destinées aux travaux maritimes des ports de Boulogne et de Calais (1885) a servi de type pour la plupart des autres fournitures importantes faites à l'Administration des Travaux Publics, se compose simplement d'une feuille de zinc de $0^m,50$ de longueur, inclinée à 45 degrés, dont le bord horizontal est fixé à un centimètre au-dessus de la mesure à remplir. On verse doucement le ciment à la cuiller, sur le sommet du plan incliné, jusqu'à ce que la mesure soit un peu plus que remplie et on enlève l'excès, comme dans la méthode précédente, en faisant glisser sur le bord une lame bien droite tenue dans un plan vertical.

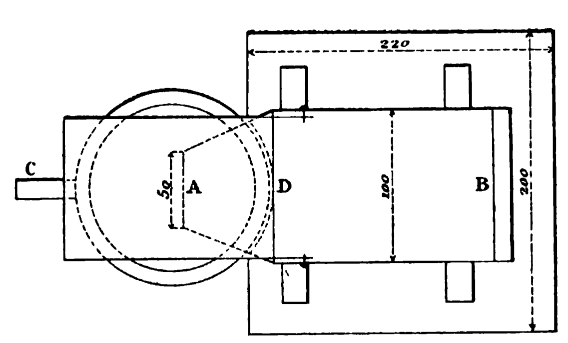


62. — Entonnoir allemand.

Entonnoir à tamis (fig. 64). — Une tôle perforée formant tamis, est disposée horizontalement dans un entonnoir terminé à sa partie inférieure par un ajutage cylindrique. L'entonnoir, dont

les dimensions ont été arrêtées après de nombreux tâtonnements, est maintenu à 0,05 au-dessus de la mesure à remplir.

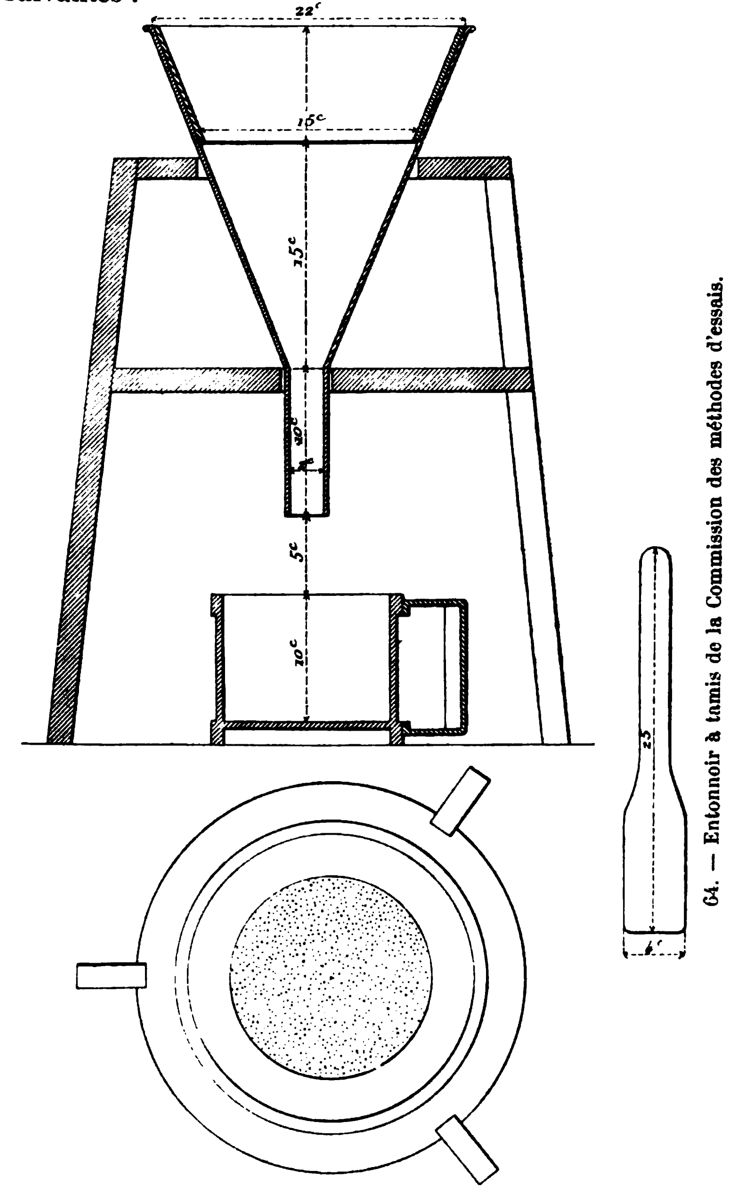




63. — Plan incliné pour déterminer le poids du litre de poudre non tassé.

Le ciment, répandu par petites masses successives sur le tamis, tombe régulièrement au centre de la mesure et l'on arrête le remplissage quand il s'est formé, au-dessus d'elle, un cône ayant le bord circulaire inférieur pour base. On facilite le passage de la poudre au moyen d'une spatule en bois de $0^{m},04$ de largeur.

Les règles à suivre pour déterminer la densité apparente sont les suivantes :



64. — Entonnoir à tamis de la Commission des méthodes d'essais.

a) La densité apparente d'un ciment sera déterminée en pesant une mesure de forme cylindrique ayant un litre de capacité et 0m,10 de hauteur, remplie au moyen de l'*entonnoir à tamis*,

b) Cet appareil se compose d'un entonnoir vertical, dont la section circulaire a $0^m,02$ de diamètre à la base et $0^m,15$ de diamètre à une hauteur de $0^m,15$ au-dessus de cette base, hauteur à laquelle est placée une tôle perforée de 1,050 trous environ, de $0^m,002$ de diamètre par décimètre carré. L'entonnoir se prolonge par un ajutage cylindrique de $0^m,02$ de diamètre et de $0^m,10$ de hauteur. L'appareil est supporté par un bâti en forme de trépied.

c) On placera tout d'abord la mesure à $0^m,05$ en contre-bas de l'extrémité inférieure de l'ajutage.

On versera ensuite le ciment dans l'entonnoir, par petites masses de 300 à 400 grammes, que l'on forcera à passer par le tamis en y promenant une spatule en bois de $0^m,04$ de largeur.

On arrêtera le remplissage quand la base du cône qui se sera élevé peu à peu au-dessus de la mesure, en aura atteint le bord supérieur. On enlèvera alors l'excès de ciment, en faisant glisser sur ce bord une lame bien droite, tenue dans un plan vertical.

Pendant toute l'opération, on n'aura fait subir à la mesure aucune trépidation ni aucun choc.

d) On adoptera comme poids du litre la moyenne des résultats obtenus dans cinq opérations successives.

e) Il est utile de faire porter les essais sur le ciment tel qu'il est livré et sur la fine poussière ayant passé au tamis de 4 900 mailles. Dans tous les cas, on indiquera, en même temps que la densité apparente, le degré de finesse de mouture de l'échantillon sur lequel on aura opéré.

Finesse de mouture. — On opère sur 100 grammes de ciment que l'on passe d'abord au tamis de 4 900 mailles, le résidu est pesé, puis on le jette sur le tamis de 900 mailles ; on pèse de nouveau ce qui reste sur ce tamis et enfin on examine si la totalité du résidu passe à travers le tamis de 324 mailles.

On peut, pour plus d'exactitude, faire plusieurs essais et prendre la moyenne des résultats obtenus ; ou bien on prélève sur l'échantillon à examiner, et à des points différents, 5 à 6 kilogrammes de ciment, on mélange bien intimement le tout et il suffit de faire ensuite un seul essai.

Les conclusions de la Commission des méthodes d'essais au sujet de la finesse de mouture sont les suivantes :

a) Pour déterminer la finesse des ciments, on fractionnera l'échantillon en quatre lots, à l'aide des trois tamis à mailles carrées définis ci-après :

1° Tamis de 324 mailles, soit 18 par centimètre linéaire, avec fil de $0^{mm},20$ de diamètre ;

2° Tamis de 900 mailles, soit 30 par centimètre linéaire, avec fils de $0^{mm},15$ de diamètre ;

3° Tamis de 4 900 mailles, soit 70 par centimètre linéaire, avec fils de $0^{mm},05$ de diamètre.

b) Les essais auront lieu sur un échantillon de 100 grammes.

c) Le tamisage à la main sera considéré comme terminé, lorsqu'il passera moins de $0^{gr},1$ de matière sous l'action de 25 tours de bras.

d) L'emploi d'une machine à secousses est recommandé pour éliminer rapidement la plus grande partie de la fine poussière.

e) Le tamisage complet à la machine est également recommandé ; mais il ne peut faire l'objet d'une prescription tant que les conditions auxquelles doit satisfaire la machine ne sont pas rigoureusement arrêtées.

f) On exprimera les résultats, pour chaque tamis, en totalisant les résidus qui ne sont pas suceptibles d'y passer.

Essai de la prise. — L'essai de prise d'un ciment se fait toujours sur la pâte pure ; il serait préférable de déterminer la prise des mélanges de ciment et de sable puisque le ciment n'est jamais employé pur ; mais il y a une grande difficulté à apprécier avec une exactitude suffisante le moment où la prise se produit quand on opère sur des mortiers. Cette question a été l'objet de discussions très longues à la Commission des méthodes d'essais et finalement on a dû s'en tenir à l'essai sur la pâte pure.

Tout d'abord on doit préparer la pâte d'une manière toujours semblable et l'amener à la consistance normale ; voici quelles sont les règles à suivre d'après la Commission des méthodes d'essais :

A. — *a*) Pour confectionner la *pâte normale de ciment*, on opérera sur un kilogramme de ciment, qu'on étalera sur une table de marbre, en formant une couronne au centre de laquelle on versera, d'un seul coup, le volume d'eau nécessaire pour satisfaire aux conditions ci-après.

Suivant la nature des essais, cette eau pourra être, soit de l'eau potable, soit de l'eau de mer.

Le mélange sera gâché fortement à la truelle pendant cinq minutes, comptées à partir du moment où l'eau aura été versée.

b) Avec une partie de la pâte obtenue, on emplira immédiatement une boîte métallique à fond plat, de forme tronconique ayant $0^{m},08$ de diamètre à la base inférieure, $0^{m},09$ à la base supérieure et $0^{m},04$ de profondeur ; on lissera la surface en faisant glisser la truelle sur le bord supérieur du moule et en évitant tout tassement et toute trépidation.

c) Au centre de la masse ainsi formée, on fera descendre normalement à la surface de la pâte, avec précaution, et sans lui laisser acquérir de vitesse, une sonde cylindrique de $0^{m},010$ de diamètre et du poids de 300 grammes, en métal poli, propre et sèche, terminée par une section nette et d'équerre. L'appareil, dit *sonde de consistance*, devra être construit de manière à pouvoir indiquer exactement l'épaisseur de pâte restant entre le fond de la boîte et l'extrémité inférieure de la sonde. On ne fera jamais deux essais sur la pâte contenue dans une même boîte.

d) On considérera comme *normale* la pâte dont la consistance sera telle que l'épaisseur de la couche restant entre le fond de la boîte et l'extrémité de la sonde, au moment ou celle-ci cessera de s'enfoncer sous l'action de son propre poids, sera de 6 millimètres.

B. — Pour les ciments à prise rapide, la quantité de ciment sur laquelle on opérera sera réduite à 500 grammes, et la durée du gâchage à une minute.

Le gâchage du ciment pur, la détermination de la consistance normale, et l'essai de la prise se font de la manière suivante en Suisse et en Allemagne :

(Prescriptions normales de M. Tetmayer. — Décisions des conférences de Dresde et de Munich). *Conditions de la prise.* — Les matériaux hydrauliques connus dans le commerce sont à prise prompte, moyenne ou lente.

Ceux dont le durcissement commence dans les quinze minutes qui suivent le gâchage doivent être désignés comme prenant rapidement.

Lorsque le commencement du durcissement a lieu au bout de soixante minutes, le produit dont il s'agit doit être considéré comme une ma-

tière hydraulique à prise lente. Les produits à prise moyenne se rangent dans les limites ci-dessus.

Remarques. — Pour déterminer les conditions de la prise d'un produit hydraulique, on se sert d'une aiguille normale pesant 300 grammes et ayant une section de 1 mm^2. On gâche 400 grammes de matière avec une quantité d'eau correspondant à sa consistance normale déterminée d'avance.

La pâte est brassée énergiquement avec une spatule en forme de cuiller pendant 3 minutes pour les produits à prise lente et demi-lente, et 1 minute pour les produits à prise prompte, puis introduite dans un moule (en forme d'anneau) que l'on pose sur une plaque de verre. On place ensuite celle-ci sous l'appareil contenant l'aiguille mormale, et on observe le moment où l'aiguille n'est plus capable de pénétrer complètement sa masse. Ce moment constitue le *commencement du durcissement* et il est d'une importance très grande dans la question de la prise, parce que les produits hydrauliques doivent être gâchés avant le commencement du durcissement, si l'on ne veut pas s'exposer à leur faire perdre de leur force.

Tout produit hydraulique peut être considéré comme ayant fait prise lorsque le durcissement est arrivé au point où l'aiguille normale ne laisse plus d'empreinte sur la surface du moule décrit ci-dessus.

Le temps nécessaire à la production de ce phénomène s'appelle *durée de la prise*. Cette dernière a une importance technique secondaire, toutefois dans son rapport avec le commencement de la prise, elle caractérise la nature d'un produit, et devrait être par conséquent toujours déterminée et indiquée.

On se sert également de l'appareil à aiguille pour déterminer la consistance de la pâte normale d'un produit hydraulique; ceci se fait en introduisant dans l'appareil, à la place de l'aiguille, un cylindre métallique d'un centimètre de diamètre et d'un poids de 300 grammes.

Le moule dans lequel on introduit la pâte dont il s'agit de déterminer la consistance, correspond à celui qu'on emploie dans l'appareil à aiguille et doit être fait en caoutchouc durci, de 4 centimètres de hauteur et de 8 centimètres de diamètre.

Pour déterminer cette consistance normale, on brasse 400 grammes de matière, d'une manière analogue à ce qui se fait pour les essais de

prise, avec une quantité d'eau approximativement choisie jusqu'à ce que l'on obtienne une pâte résistante avec laquelle on remplit le moule de l'appareil sans le secouer.

Après avoir lissé la surface de la pâte, on y introduit avec soin le cylindre servant à mesurer la consistance. S'il reste suspendu d'environ 5 millimètres au dessus de la surface inférieure du moule, on peut considérer la consistance de la pâte comme normale.

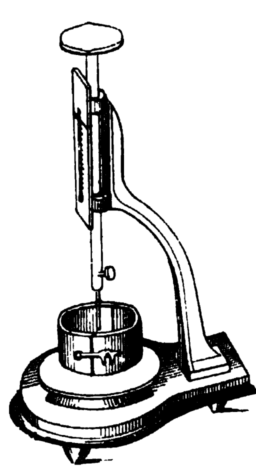
La prise des matériaux hydrauliques dépendant de la température de l'air et de celle de l'eau avec laquelle ils sont gâchés, en ce sens que des températures plus élévées ou plus basses accélèrent ou diminuent le temps de la prise, il faut toujours faire les essais à une température moyenne de 15° centigrades soit pour l'air, soit pour l'eau.

En ce qui concerne la prise des pâtes de ciment les conclusions de la commission sont les suivantes :

A. — *a*) Les essais de prise des pâtes de ciment comporteront la détermination du *début* et de la *fin de la prise*.

b) Au moment du gâchage, les températures du ciment, de l'eau et de l'air, devront être comprises entre 15 et 18 degrés centigrades.

Immédiatement après sa confection, la pâte sera, avec les précautions indiquées précédemment, introduite et dérasée dans une boîte semblable à celle décrite au même paragraphe (A, *b*).



65. — Aiguille Vicat.

Aussitôt remplie, la boîte sera immergée dans un bac contenant de l'eau dont la température sera maintenue entre 15 et 18 degrés. La boîte ne sera extraite du bac que pendant le temps nécessaire pour chaque constatation.

c) On emploiera pour les essais, une aiguille en métal, dite *aiguille Vicat*, cylindrique, lisse, propre sèche, terminée par une section nette et d'équerre d'un millimètre carré (diamètre 1^{mm},13), et pesant 300 grammes (*fig.* 65).

On appellera *début de la prise*, l'instant où cette aiguille, descendue normalement à la surface de la pâte, avec précaution, et sans qu'on lui laisse acquérir de vitesse, ne pourra plus pénétrer jusqu'au fond de la boîte.

On appellera *fin de la prise,* l'instant à partir duquel la surface de la pâte pourra supporter la même aiguille, sans qu'elle y pénètre d'une quantité appréciable.

Les durées correspondantes seront comptées à partir du moment où l'eau de gâchage aura été mise au contact du ciment.

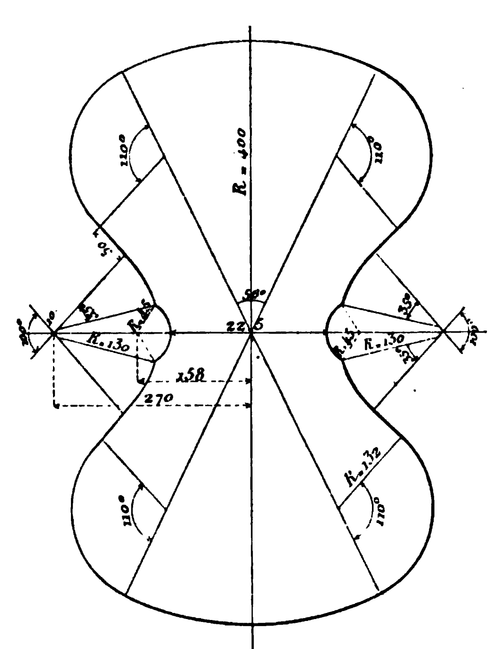
d) Dans le cas où l'on voudra déterminer la prise dans l'air, on opérera comme il vient d'être indiqué, à cette différence près que la boîte, aussitôt remplie, sera maintenue dans l'air à une température comprise entre 15 et 18 degrés ; on aura soin de vider, au fur et à mesure, l'eau qui pourra remonter à la surface de la pâte et s'en séparer.

B. — L'*essai normal* de prise portera sur la pâte normale de ciment immergée ainsi qu'il est dit ci-dessus (A, *b*).

C. — Les dispositions qui précèdent s'appliquent aux ciments à prise rapide comme aux ciments à prise lente.

Essais de rupture par traction. — L'emploi de la briquette en 8 de 5 centimètres carrés de section est aujourd'hui à peu près général ; on ne se sert plus des briquettes de 16 centimètres carrés qui exigeaient pour les rompre des machines très fortes et encombrantes.

La Commission des méthodes d'essais a déterminé géométriquement les dimensions exactes de la briquette en 8 par le croquis ci-contre (*fig.* 66).

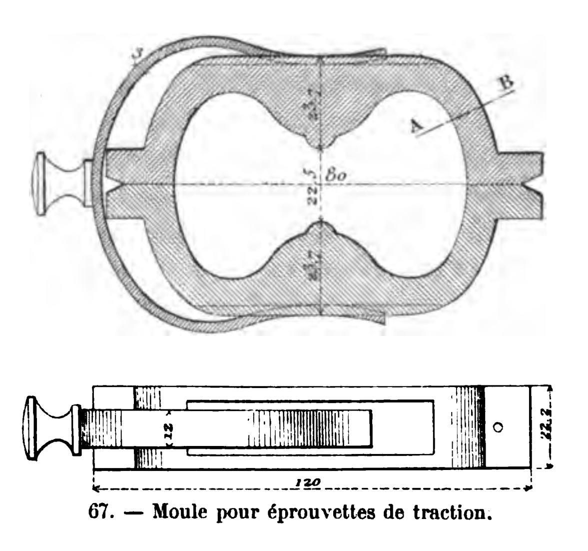


66. — Briquette de traction.

Pour confectionner ces briquettes on emploie généralement des moules représentés par la figure 67.

Les briquettes de ciment pur se préparent avec la pâte à con-

sistance normale obtenue en suivant les prescriptions données à propos des essais de prise.



67. — Moule pour éprouvettes de traction.

La confection des mortiers normaux a été définie ainsi par la Commission des méthodes d'essais :

A. — *a*) Pour la confection des mortiers normaux, on fera usage du sable naturel provenant de la plage de Leucate (Aude), convenablement tamisé, qui sera dit *sable normal.*

On emploiera suivant les cas, ainsi qu'il est expliqué ci-dessous, *le sable normal simple* et *le sable normal composé.*

b) Le *sable normal simple* sera formé de grains ayant passé au tamis en tôle perforée de trous de $1^{m},5$ de diamètre et ayant été retenu par le tamis à trous de 1 millimètre.

c) Le *sable normal composé* sera formé par un mélange par poids égaux des sables ci-après :

N° 1, dont les grains ayant passé au tamis de 1 millimètre, ont été retenus par le tamis de $0^{mm},5$.

N° 2, dont les grains ayant passé au tamis de $1^{mm},5$, ont été retenus par le tamis de 1 millimètre.

N° 3, dont les grains ayant passé au tamis de 2 millimètres, ont été retenus par le tamis de $1^{mm},5$.

B. — *a*) Il sera fait usage pour les essais autres que ceux de rupture,

d'un *mortier normal plastique*, et pour les essais de rupture, d'un *mortier normal sec.*

b) *Les mortiers normaux* seront dosés en poids à raison de une partie de ciment pour trois parties de sable et seront gâchés, suivant la nature des essais, à l'eau potable ou à l'eau de mer.

On opérera sur un kilogramme de matières (250 grammes de ciment et 750 grammes de sable) qu'on mélangera intimement à sec. Ensuite, sur une table de marbre, on formera une couronne au centre de laquelle on versera, d'un seul coup, la quantité d'eau à employer, et le mélange sera gâché fortement à la truelle pendant 5 minutes.

c) Pour la confection du *mortier normal sec*, on emploiera du sable normal simple. La quantité d'eau employée au gâchage sera de 45 grammes augmentée du sixième de celle nécessaire pour amener 1 kilogramme de ciment à l'état de pâte normale de ciment.

d) Pour la confection du *mortier normal plastique*, on emploiera du sable normal composé. La quantité d'eau employée au gâchage sera telle que le mortier obtenu ait une consistance plastique (1).

Pour s'assurer que cette consistance est bien réalisée, on emplira, avec une partie du mortier obtenu, la boîte métallique destinée aux essais de consistance, et on dérasera et lissera la surface à la truelle ; la consistance sera considérée comme satisfaisante si, après le lissage, le mortier ressue légèrement sous l'effet de quelques coups de truelle frappés sur les côtés de la boîte.

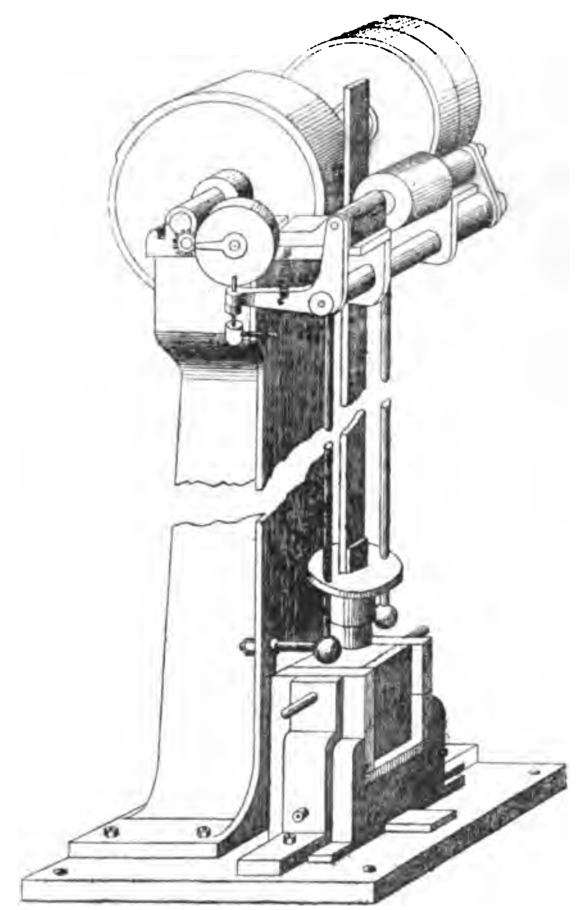
C. — Pour le ciment à prise rapide la quantité de matières sur laquelle on doit opérer sera réduite à 500 grammes, et la durée du gâchage à une minute.

D. — On recommande pour les essais des mortiers autres que les essais normaux, d'employer, de préférence à tous autres, les dosages en poids de 1 partie de ciment pour 2 de sable normal (mortiers riches) et 1 partie de ciment pour 5 de sable normal (mortiers maigres). Le premier de ces dosages est particulièrement utile pour les ciments à prise rapide en vue de compléter les renseignements fournis par le mortier normal dosé 1 : 3.

(1) Dans un grand nombre de cas, cette quantité est celle nécessaire pour confectionner le *mortier normal sec* augmentée de 15 grammes.

Le mélange et le gâchage du mortier se font beaucoup plus facilement en se servant d'un récipient dans lequel on brasse le mortier avec la spatule.

En Allemagne et en Suisse les briquettes de mortier sont comprimées fortement ; on emploie pour leur préparation la machine à pilon de Tetmayer représentée figure 68 et l'appareil

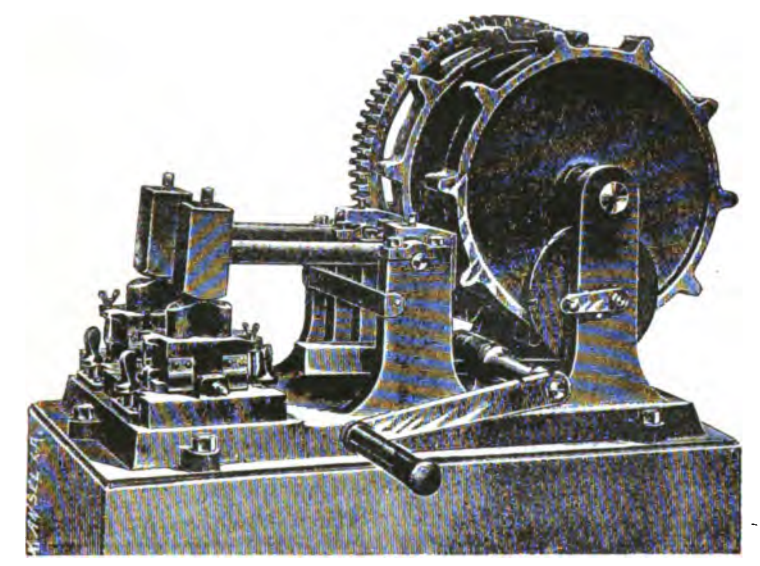


68. — Appareil à pilon pour la préparation des éprouvettes de traction et de compression.

à marteau, ou de Böhme (*fig.* 69). Avec ces machines on donne un nombre de coups déterminé, et le mouton, ou le marteau, ayant un poids uniforme, il semble que les briquettes doivent être faites dans des conditions toujours identiques. Les ruptures

sont en effet bien régulières; mais ces appareils, en outre de leur prix assez élevé, sont d'un maniement peu commode et les opérations sont très longues.

Dans le cahier des charges de M. Guillain la manière d'opé-



69. — Appareil à marteau pour la préparation des éprouvettes de traction et de compression.

rer pour confectionner les briquettes de mortier est ainsi décrite.

Ayant placé sur un support inébranlable une plaque de marbre ou de métal poli, on y déposera les moules préalablement bien nettoyés et humectés. On pèsera 125 grammes de ciment et 375 grammes de sable, que l'on mélangera intimement à sec dans une capsule avec une spatule. On y ajoutera la quantité d'eau de mer nécessaire (soit 60 centimètres cubes), puis on remuera fortement toute la masse avec la spatule pendant cinq minutes, comptées à partir du moment où l'eau aura été versée. On obtiendra ainsi un mortier ayant l'aspect de la terre humide fraîchement remuée. Ce mortier sera introduit d'une seule fois dans les moules, en quantité suffisante pour qu'il fasse encore saillie au-dessus des bords, après le damage.

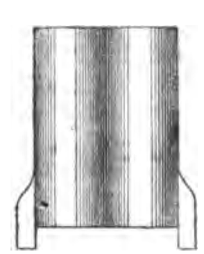
On damera le mortier dans le moule avec une petite massette du poids d'environ 200 grammes (*fig.* 70), d'abord à petits coups répétés, sur le

pourtour de la briquette puis au centre ; on frappera ensuite plus énergiquement, en suivant toujours le même chemin, et on continuera le damage jusqu'à ce que la masse commence à prendre un peu d'élasticité et sue l'eau à la surface. On enlèvera alors le trop plein du moule avec une lame de couteau bien droite, et on lissera la surface en promenant le couteau appuyé sur les bords du moule.

70. — Spatule.

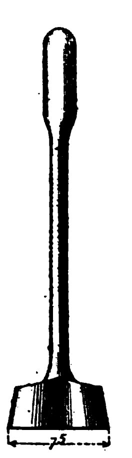
Mais l'emploi de la spatule est assez délicat et il faut avoir une certaine habileté pour obtenir des résultats concordants.

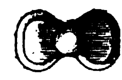
On peut obtenir une compacité et une régularité plus grandes en comprimant le mortier dans le moule à l'aide d'un pilon. Pour y parvenir on place sur le moule un guide de 0,15 de hauteur (*fig.* 71) ; ce guide est simplement fixé par deux fourches qui s'encastrent dans les deux extrémités saillantes du moule ; on peut, par conséquent, le placer et le retirer facilement. Le pilon a la même forme que la briquette, mais avec une surface un peu moindre (*fig.* 72).



71. — Guide pour le pilonnage des éprouvettes de traction.

Quand on veut préparer une briquette de mortier, on mesure où on pèse une quantité déterminée de mortier que l'on jette dans le moule, le guide étant déjà placé sur celui-ci ; puis on pilonne, d'abord doucement, pour bien tasser la masse, puis plus énergiquement jusqu'à ce que l'eau commence à paraître en dessous du moule. La proportion d'eau à employer généralement est de 10 % du poids du mortier, quand on se sert de sable normal artificiel, avec un sable naturel il faut seulement 8 à 9 % d'eau. Ce procédé très simple donne de très bons résultats et il présente l'avantage de pouvoir être employé avec succès par le premier ouvrier venu.





72. — Pilon.

M. Feret, dans son rapport sur la confection des mortiers d'essai, constate qu'un maçon qui n'avait encore jamais fait d'essais d'aucune espèce a obtenu du premier coup, à l'aide du pilon, des résistances très sensiblement égales aux moyennes de celles des autres opérateurs. Malgré cet avantage très important la Commission n'a pas cru devoir abandonner l'usage de la spatule ; voici les règles qu'elle a formulées au sujet de la préparation des éprouvettes.

A. — *a*) Pour les essais de rupture par traction, on fera usage d'éprouvettes en forme de 8, dites *briquettes normales,* ayant une section au milieu de 5 centimètres carrés, du type défini par le croquis ci-dessus (*fig.* 66).

b) Les moules, présentant en creux la forme des briquettes (*fig.* 67), seront placés sur une plaque de marbre ou de métal poli, après avoir été, ainsi que la plaque, bien nettoyés et frottés d'un linge gras.

On remplira d'une même gâchée six moules à la fois, s'il s'agit de ciment à prise lente et quatre s'il s'agit de ciment à prise rapide, en mettant du premier coup, dans chaque moule, assez de matière pour qu'elle déborde. On tassera avec le doigt pour ne laisser aucun vide, et on frappera quelques coups de truelle sur les côtés du moule pour compléter le tassement et faciliter le dégagement des bulles d'air. Puis, on dérasera en faisant glisser une lame de couteau bien droite, presque horizontalement sur les bords du moule, de manière à enlever tout l'excédent, sans exercer aucune compression. On procédera enfin au lissage de la surface en y promenant le couteau, appuyé toujours sur les bords.

Si l'on opère sur de la pâte de ciment, on attendra, pour déraser, qu'elle ait pris une consistance suffisante.

c) On procédera au démoulage en faisant glisser les moules sur la plaque, en les desserrant et en les éloignant des briquettes sans les soulever, au bout de 24 heures comptées à partir du commencement du gâchage et avant, s'il est nécessaire, au cas où la prise serait certainement terminée.

Dans tous les cas, pendant ce délai de 24 heures, les briquettes seront conservées sur leur plaque, dans une atmosphère saturée d'humidité, à l'abri des courants d'air et des rayons directs du soleil, à une tempéra-

ture comprise, autant que possible, entre 15° et 18°. Le délai de 24 heures sera réduit à 1 heure pour les pâtes de ciment à prise rapide et à 3 heures pour les mortiers du même ciment.

d) Il est recommandé de peser les briquettes après le démoulage, si l'on veut s'assurer de la régularité de leur confection.

e) A l'expiration des délais fixés ci-dessus au paragraphe (*c*), on exposera les briquettes dans le milieu choisi pour leur conservation.

Si les briquettes sont immergées dans l'eau douce, la profondeur de l'eau dans le bac ne dépassera pas un mètre, et cette eau sera renouvelée toutes les semaines.

Si elles sont immergées dans l'eau de mer, le renouvellement aura lieu tous les deux jours pendant la première semaine et ensuite toutes les semaines. Pendant la première semaine, le volume occupé par l'eau dans le bac devra être égal à 4 fois, au moins, celui des briquettes.

(On spécifiera dans tous les cas la nature de l'eau de conservation).

Si les briquettes sont conservées à l'air, l'état hygrométrique sera tenu aussi voisin que possible de la saturation, et elles seront placées à l'abri des courants d'air et des rayons directs du soleil.

La température du milieu (eau ou air) sera maintenue, autant que possible, entre 15° et 18°.

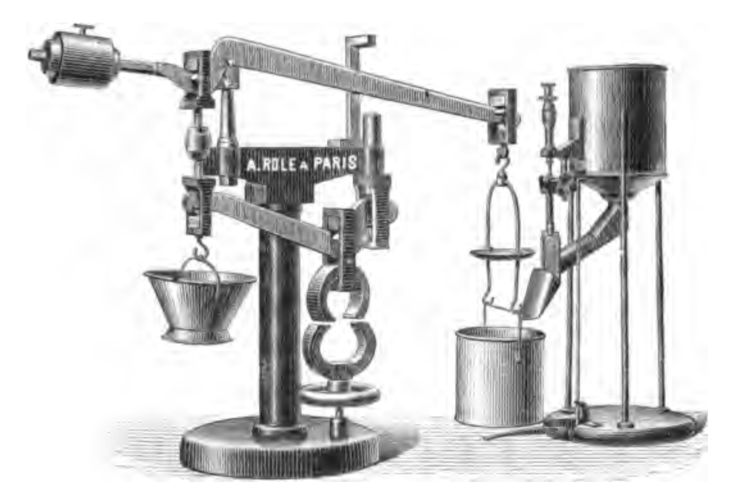
B. — *a*) Les *essais normaux* de rupture par traction porteront sur la *pâte normale* de *ciment* et sur le *mortier normal sec*, conservés dans l'eau douce.

On se conformera, pour ces essais, aux dispositions générales ci-dessus (A) et aux dispositions spéciales ci-après, en ce qui concerne la confection des briquettes :

b) Au moment du mélange, le ciment, le sable, l'eau et l'air seront à des températures comprises entre 15° et 18°.

Le mortier normal sec sera damé dans le moule avec une spatule en fer longue de 0^{m},35 environ, manche compris, présentant une surface de battage de 25 centimètres carrés et pesant 250 grammes. On procédera d'abord par petits coups répétés sur le pourtour de la briquette, puis au centre ; on frappera ensuite plus énergiquement, en suivant toujours le même chemin, et en continuant le damage jusqu'à ce que la masse commence à prendre un peu d'élasticité et que l'eau sue à la surface. On procèdera ensuite au dérasement et au lissage, comme il a été expliqué plus haut (A, *b*).

Pour rompre les briquettes de 5 centimètres carrés on se sert d'une machine à levier représentée par la figure 73. Dans cette machine l'effort transmis à la briquette est de 50 fois le poids



73. — Appareil pour essais de traction.

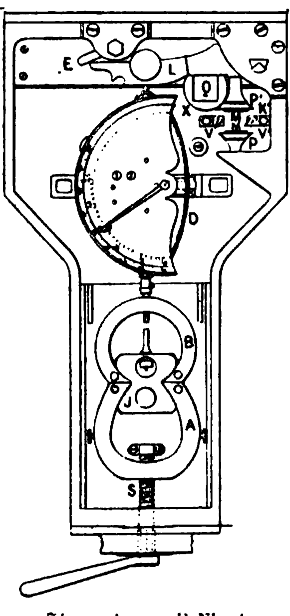
appliqué à l'extrémité du grand levier. Pour obtenir une charge progressive et uniforme on suspend à ce levier un seau dans lequel on fait écouler de la grenaille de plomb. Cette grenaille est contenue dans un réservoir d'où elle s'échappe par un ajutage muni d'une vanne qui se ferme automatiquement, au moment de la rupture.

L'écoulement du plomb doit être réglé à 100 grammes par seconde.

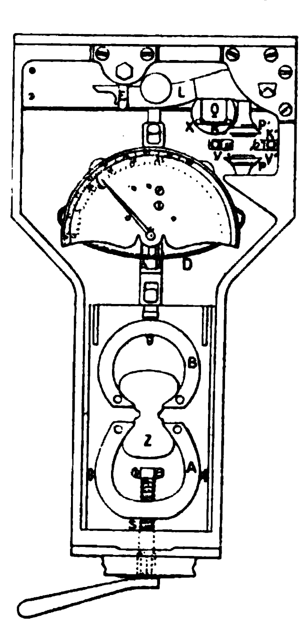
Appareil Nivet. — Cet appareil forme sous un petit volume et un faible poids (18 kilogrammes) un laboratoire complet d'essais. Il contient dans une boîte qui lui sert de bâti, non seulement l'appareil de mesure des divers coefficients de rupture à la flexion, la traction, le cisaillement et la compression, mais encore les moules nécessaires à la préparation des éprouvettes et l'aiguille de Vicat destinée à déterminer le temps de prise.

L'instrument de mesure est un dynamomètre D (*fig.* 74) de Régnier, ellipse en acier sur laquelle on agit soit en comprimant le petit axe entre deux étriers (*fig.* 75), soit en opérant une trac-

tion sur les deux extrémités du grand axe (*fig.* 74). Ces deux modes d'action ont pour effet de diminuer le petit axe, mais dans le premier cas, le dynamomètre est très sensible, et très résistant dans le second. Dans le mouvement de rapprochement des deux branches de l'ellipse l'une d'elles agit sur le talon d'une cremaillère qu'elle pousse dans une gaîne, où elle rencontre un pignon sur lequel est colée l'aiguille qui indique l'effort sur un cadran divisé. Ce cadran et tout le mécanisme sont montés sur la deuxième branche de l'ellipse. Lorsque le ressort se détend, la crémaillère reste en place, ainsi que l'aiguille qu'on ramène après lecture au zéro de la division. Le cadran porte deux graduations correspondant aux deux modes d'emploi du dynamo-




74. — Appareil Nivet.



75. — Appareil Nivet.

mètre. Ce dynamomètre remplace directement le plateau chargé de poids au moyen duquel il a été gradué de 0 à 125 kilogrammes pour les efforts qui agissent suivant le petit axe et de 0 à 550 kilogrammes pour ceux qui s'exercent sur le grand axe.

L'appareil Nivet peut faire deux séries d'essais : la première comprend les expériences de traction et de compression usitées dans les laboratoires sur des briquettes en forme de 8 de 5 cen-

timètres carrés de section minimum et sur des cubes de différentes dimensions; la seconde série s'applique à un type unique d'éprouvette au moyen de laquelle M. Nivet détermine les coeficients de rupture à la flexion, à la traction, au cisaillement et à la compression.

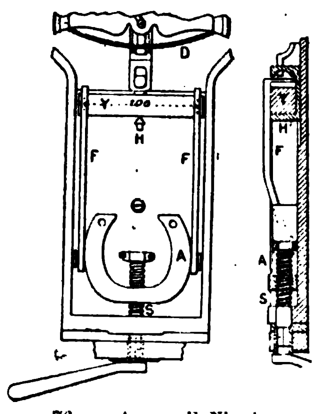
Les briquettes en 8 se placent (*fig.* 75) pour les essais de traction entre deux mâchoires, dont l'une est liée au dynamomètre, et l'autre actionnée par une vis à laquelle on peut donner, par une manette, un mouvement régulier aussi lent qu'on le désire. Lorsque la rupture a été obtenue, l'aiguille du dynamomètre reste en place, indiquant le cinquième de l'effort réel, c'est-à-dire la charge par centimètre carré.

Les expériences d'écrasement se font sur des cubes de section de 5 centimètres carrés, 2, 5 centimètres et même un centimètre. La compression s'opère entre deux plateaux PP' (*fig.* 74), dont l'un est appuyé sur le bâti et l'autre relié à un levier L, qui prend également son point d'appui sur le bâti, dont l'extrémité libre est commandée par le dynamomètre. Ce levier, lorsqu'on fait l'essai de traction, est rendu fixe par un anneau E qui l'immobilise ainsi que le point d'attache du dynamomètre; pour faire les essais de compression, après avoir rendu la liberté au levier, on soude les mâchoires au moyen d'un organe rigide; cet organe J (*fig.* 74) est l'aiguille de Vicat à laquelle on a donné la forme nécessaire pour assembler ces mâchoires. Le plateau mobile est placé en un point du levier tel que la pression mesurée par le dynamomètre soit multipliée par 5. Les plateaux sont engagés, l'un dans le bâti, l'autre dans le levier par des pointes coniques qui entrent dans des sièges également coniques d'angle au centre plus grand, de sorte qu'ils peuvent prendre autour de leurs sommets une certaine amplitude de mouvements et ne sont pas forcément parallèles comme les plateaux des presses hydrauliques. Dans la deuxième série d'essais on obtient les coefficients de flexion, traction, cisaillement et compression sur un même solide prismatique à base carrée de $0^m,01 \times 0^m,02 \times 0^m,11$.

Le premier essai est celui de flexion; le prisme est saisi, pour cette opération, par deux étriers FF (*fig.* 76) maintenus à $0^m,10$

de distance et reliés à la vis, tandis qu'un étrier antagoniste H, fixé au dynamomètre, le fléchit en son milieu.

Les deux tronçons laissés par l'opération de la flexion sont, l'un après l'autre, rompus par traction. Cet essai se fait en saisissant chaque solide entre deux pinces dont on arme les mâchoires. Chaque pince est composée de deux coins reliés l'un à l'autre par une glissière perpendiculaire aux faces parallèles qui saisissent le prisme et dont les faces inclinées s'engagent entre les branches de la mâchoire. Lorsque l'on fait jouer la vis, ces plans inclinés tendent à serrer les faces du prisme pour s'opposer au glissement jusqu'au moment où la rupture se produit par arrachement. La pression exercée sur le solide par les faces parallèles des pinces étant perpendiculaire à l'axe de traction n'a pas d'influence sur le résultat.



76. — Appareil Nivet.

Le prisme se trouve divisé en quatre fragments ; on choisit les deux plus longs pour faire le cisaillement. Pour cette rupture, on place les tronçons du prisme dans le vide carré Q (*fig.* 74) d'un cylindre vertical X engagé dans le bâti de l'appareil, dans lequel il tourne à frottement doux. Le cisaillement est fait par une arête de la face inférieure du levier opérant par son milieu. Si l'on néglige les fragments détachés par cisaillement on a encore quatre tronçons de prisme qui peuvent servir à l'essai d'écrasement.

Pour faire cet essai on place les tronçons de prisme horizontalement entre les deux plateaux que l'on a armés de deux poinçons, ou plaques de $0^{m},02$ de largeur MM (*fig.* 74) placés verticalement dans l'axe des plateaux. On saisit ainsi entre les poinçons un cube parfait inscrit dans le prisme. Les tronçons de prisme se conduisent comme des cubes et, si la matière est homogène, donnent des résultats sensiblement égaux.

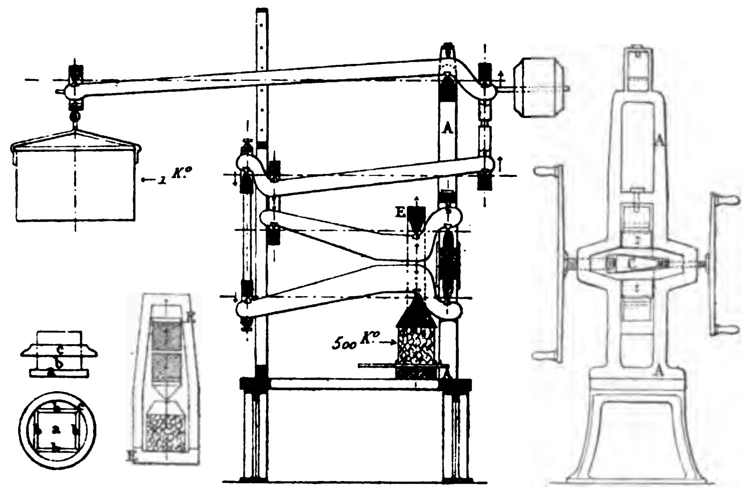
Essais à la compression. — Les éprouvettes destinées aux

essais à la compression ont la forme de cubes; ces cubes ont le plus souvent 50 centimètres carrés de surface. Pour faire les cubes de ciment pur on opère comme pour les briquettes; quand il s'agit du mortier 1 : 3 on peut employer deux procédés.

1° On pilonne à la main le mortier dans le moule qui est surmonté d'un guide; on ne jette pas d'une seule fois tout le mortier dans le moule, car l'épaisseur de la couche de mortier serait trop grande et on n'aurait pas une compression uniforme. On remplit le moule en deux ou trois fois; quand une couche est pilonnée, on gratte la surface du mortier pour favoriser la liaison avec la couche suivante. La quantité d'eau à employer pour le gâchage varie de 10 à 10, 5 °/₀ avec le sable artificiel, et de 8 à 9 °/₀ avec le sable naturel de même grosseur.

2° La compression est produite mécaniquement à l'aide d'un pilon tombant d'une certaine hauteur. On emploie alors les mêmes appareils que pour les briquettes de traction (*fig.* 68-69).

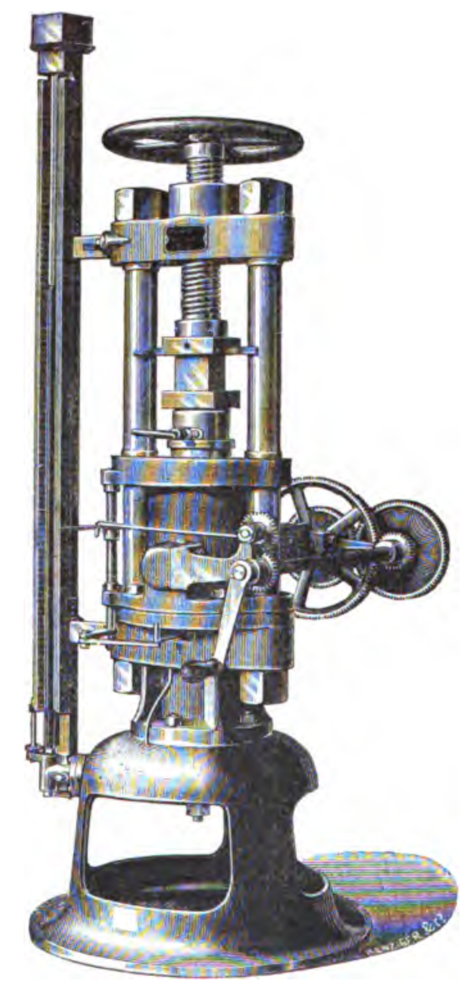
Pour écraser les cubes d'essais on se sert tantôt de presses hydrauliques, tantôt d'une machine à leviers analogue à celle qui est employée pour rompre les briquettes par traction. La presse hydraulique est bien connue et n'a pas besoin d'être décrite.



77. — Appareil Schickert pour essais à la compression.

L'appareil à leviers est représenté par la figure 77. La charge

est multipliée par 500 de sorte que l'on peut, avec 100 kilogrammes placés à l'extrémité du levier, produire un effort de 50 000 kilogrammes sur le cube. La charge est donnée par des poids que l'on place dans un seau suspendu à l'extrémité du grand levier; on commence par des poids de 2 à 5 kilogrammes, ou même 10 kilogrammes, selon la résistance présumée du mortier, et on continue avec des poids de plus en plus faibles jusqu'à ce que la rupture se produise.



78. — Presse Amsler-Laffon.

La presse construite par la maison Amsler Laffon, de Schaffouse, est considérée comme l'appareil le plus parfait pour l'exécution des essais à la compression (*fig.* 78). On place l'éprouvette entre les plaques de serrage dont la supérieure G (*fig.* 79-80-81) se baisse ou se lève au moyen d'un volant J; l'inférieure F se loge dans une cavité sphérique au-dessus du piston principal A. Pour appliquer la pression à l'éprouvette, on tourne la manivelle N, ce qui fait monter le grand piston A. L'effort se lit sur le manomètre à mercure D; la colonne de mercure monte au fur et à mesure que l'effort augmente. Le mercure fait mouvoir un petit flotteur qui, s'arrêtant au moment de l'écrasement de l'éprouvette, indique sa résistance.

Il y a deux graduations le long du tube transparent renfer-

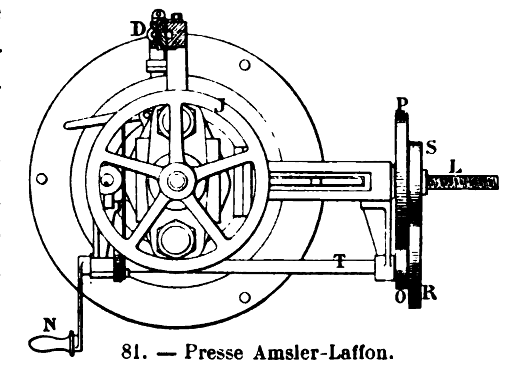
mant le mercure ; l'une d'elles indique la résistance exprimée

79. — Presse Amsler-Laffon.

80. — Presse Amsler-Lafion.

en tonnes, l'autre, en kilogramme par centimètre carré en supposant que l'éprouvette soit un cube de dimension normale (7 centimètres de côté).

La machine est une presse hydraulique pourvue d'un système de pistons réduisant la pression du liquide de manière qu'elle puisse être comparée à la pression d'une colonne de mercure de hauteur



81. — Presse Amsler-Laffon.

convenable. Les cylindres sont remplis d'huile ; il n'y a ni manchons en cuir, ni presse-étoupes ; c'est la viscosité du liquide même remplissant les cylindres qui produit l'étanchement ; les pistons marchent très facilement et il n'y a presque pas de frottement.

L'exactitude de cette presse est à peu près la même que celle d'une machine à leviers, mais elle est plus solide à cause de l'absence de couteaux ou autres organes pouvant se détériorer ; le fonctionnement est plus simple puisqu'il n'y a pas de poids à employer et que l'équilibre s'établit tout seul.

Voici comment se produit la pression (*fig.* 73) : on fait avancer le piston L au moyen de la manivelle N. En pénétrant dans le cylindre K, le piston L déplace une certaine quantité du liquide, ce qui fait monter le piston A. La pression du liquide tend également à faire descendre le petit piston B s'appuyant sur le piston C. Le fond du cylindre M est rempli de mercure sur lequel flotte une couche d'huile, celle-ci ne sert qu'à rendre le piston C étanche ; le cylindre M communique avec le tube transparent du manomètre.

La pression exercée sur le mercure par le piston C dépend évidemment du rapport des sections des pistons B et C, et de la pression de l'huile du cylindre K. La force avec laquelle le piston A tend à monter dépend également de la pression de l'huile du cylindre M et de la section du piston A. Il en résulte que la hauteur de la colonne de mercure équilibrant le piston A est proportionnelle à la force exercée par celui-ci. Les indications du manomètre ne dépendent que du rapport des pistons et du poids spécifique du mercure. Toutes ces quantités ont des valeurs absolument constantes.

Depuis quelque temps on a cherché à simplifier les essais à la compression en supprimant les éprouvettes spécialement destinées à cet essai et en utilisant les briquettes rompues pour l'essai de traction. Il est, en effet, très logique de se servir de ces éprouvettes, car on est certain d'opérer sur des mortiers identiques, C'est ce procédé que la Commission des méthodes d'essai a adopté.

A. — *a*) Pour les essais de rupture par compression, on prendra comme éprouvettes les demi-briquetttes séparées par la traction. Chaque demi-briquette sera écrasée isolément, mais on totalisera les résultats fournis par les deux demi-briquettes jumelles.

A défaut de demi-briquettes, on pourra se servir d'éprouvettes cylindriques de 45 millimètres de diamètre et de 22 millimètres de hauteur, confectionnées et conservées comme les briquettes destinées aux essais de rupture par traction.

b) Les éprouvettes qui présenteront des rugosités ou des soulèvements apparents, seront aplanies par un léger frottement à la main sur une table de grès.

c) L'appareil de rupture sera disposé de telle sorte que l'effort de compression puisse croître d'une manière continue, et amener l'écrasement d'une demi-briquette au bout de une à deux minutes.

d) Les essais seront faits aux époques fixées pour ceux de rupture par traction, et porteront comme eux, sur une série de six briquettes.

e) Les résultats seront produits pour les six éprouvettes doubles (deux demi-briquettes jumelles) soumises aux essais ; en même temps, on formulera leur moyenne et on signalera les anomalies.

On exprimera les résultats en disant, que « la résistance à l'écrasement mesurée en opérant sur des demi-briquettes normales en 8 est de tant de kilogrammes par centimètre carré (1).

Essai de flexion, de perméabilité, d'adhérence. — Ces divers essais sont quelquefois employés pour des recherches spéciales. Pour essayer les ciments à la flexion, on donne au mortier la forme d'une barre d'une certaine longueur et d'une section déterminée. La barre étant posée sur deux couteaux, on charge le milieu soit directement, soit à l'aide de l'appareil à leviers (disposition de l'Ecole des Ponts et Chaussées) (2), jusqu'à ce que la rupture se produise.

Les essais de perméabilité peuvent s'exécuter de diverses façons. En Allemagne, on confectionne des rondelles de mortier

(1) La surface d'une briquette, par laquelle il faut diviser la charge totale de rupture, est de $31^{cm^2},3$.

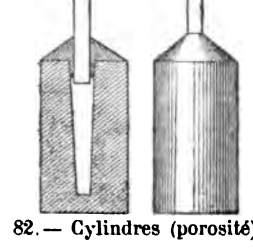
(2) Voir sur les essais à la flexion et sur les essais à la compression et à la traction une note de M. Durand Claye. *Annales des Ponts et Chaussées*, août 1888.

qui sont soumises à une pression d'eau plus ou moins considérable.

M. Alexandre donne au mortier la forme d'un cylindre creux fermé à la partie inférieure ; dans la partie supérieure est fixé, par un système particulier, un tube en verre mis en communication avec un réservoir placé à une certaine hauteur.

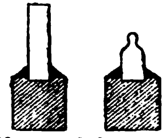
Nous avons également utilisé cette disposition, mais en modifiant la manière de fixer le tube en verre qui est scellé directement dans le mortier avec du ciment pur, comme le montre la figure ci-dessous (*fig.* 82).

Au laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées on emploie aussi ce système; on se sert également d'un procédé plus facile à réaliser.


82.— Cylindres (porosité).

On prend simplement un bloc de 50 centimètres carrés de surface, pareil à ceux qui servent pour les essais à la compression, et sur une des faces on place un tube en verre qui est fixé sur le cube avec du ciment pur. On se contente de remplir d'eau le tube, s'il est assez élevé, ou bien on le relie par un tuyau de caoutchouc à un réservoir placé à une certaine hauteur (*fig.* 83).

Avec ces diverses dispositions, on peut s'assurer si un mortier est imperméable ou s'il laisse passer beaucoup ou peu d'eau ; mais la quantité d'eau qui passe dans un temps donné est peu susceptible d'être mesurée exactement. En effet, deux mortiers exécutés absolument de la même façon peuvent laisser passer des quantités d'eau assez différentes ; en outre celles-ci diminuent avec le temps, et des mortiers très perméables au début arrivent à ne plus laisser passer d'eau. Aussi ces essais sont-ils plutôt destinés à examiner l'action de certains sels, ou de l'eau de mer, sur des mortiers perméables.


83. — Cubes (porosité).

La Commission des méthodes d'essais a formulé des règles non seulement au sujet des essais de perméabilité mais aussi de porosité :

I. *Porosité.* — A. La porosité d'une pâte ou d'un mortier a pour mesure le rapport du volume des vides que présente cette pâte ou ce mortier, au volume apparent total, le vide comprenant le volume occupé par l'eau d'imbibition et par l'eau hygrométrique, à l'exclusion de l'eau de combinaison, qui fait évidemment partie du plein.

Si l'on appelle V le volume apparent total, v le volume du plein, la porosité est donnée par la formule :

$$\text{Porosité} = \frac{V - v}{V}.$$

B. — *a*) Pour déterminer la porosité, on opérera sur des éprouvettes ayant, autant que possible, un volume apparent compris entre $0^{l}.30$ et $0^{l},50$.

b) Le volume plein (v) s'obtiendra en prenant la différence ($P - p$), du poids de l'éprouvette sèche pesée dans l'air (P) et du poids de l'éprouvette imbibée d'eau, pesée dans l'eau (p).

Pour réaliser l'imbibition complète, on maintiendra l'éprouvette pendant un quart d'heure dans l'air raréfié à une pression ne dépassant pas 25 millimètres de mercure et on fera arriver de l'eau sur l'éprouvette jusqu'à son immersion complète, en conservant le même degré de vide. Une fois l'éprouvette recouverte d'eau, on laissera la pression atmosphérique se rétablir et on attendra 24 heures avant de faire la pesée qui doit donner (p).

A défaut de moyen convenable pour raréfier l'air, on produira l'imbibition par l'action de l'eau bouillante, quand les mortiers pourront supporter cette action sans inconvénient. A cet effet, on laissera l'éprouvette le pied dans l'eau pendant 48 heures; au bout de ce temps, on l'immergera complètement dans l'eau froide qui sera portée à l'ébullition et maintenue ensuite au même état pendant deux heures. Puis on laissera refroidir sans sortir l'éprouvette et on fera, au bout de 24 heures, la pesée qui doit donner (p).

Pour obtenir la dessication de l'éprouvette, on la maintiendra jusqu'à ce qu'elle ne perde plus de poids, dans une étuve chauffée entre 40 et 50 degrés. Le poids final mesuré sera (P). Pour cette opération, on évitera avec soin la pénétration dans l'étuve de l'acide carbonique provenant des produits de la combustion de l'appareil de chauffage.

Pour certains produits, la dessication effectuée dans ces conditions

pourra laisser encore un peu d'eau hygrométrique ou, au contraire, enlever un peu d'eau combinée, ce qui laisse subsister une légère incertitude sur les valeurs trouvées pour la porosité.

c) Le volume apparent de l'éprouvette (V), peut s'obtenir par des mesures directes, si elle présente une forme géométrique. Dans le cas contraire, on mesurera ce volume en prenant la différence entre les poids de l'éprouvette pesée dans l'eau et dans l'air, son état d'imbibition étant resté le même. Pour assurer la constance de cet état d'imbibition, on enduira l'éprouvette d'une mince couche de suif fondu qui sera posée au pinceau et étendue avec le doigt. On aura soin de faire la pesée dans l'eau avant la pesée dans l'air.

C. — *a*) L'*essai normal* de porosité portera sur le mortier normal plastique âgé de 28 jours, conservé dans l'eau.

b) Pour les essais qui seraient faits sur des mortiers d'âge et de composition différents, on recommande d'employer de préférence des mortiers plastiques dosés à 1 : 2 et à 1 : 5 âgés de 7 jours, 28 jours, 3 mois, 6 mois, 1 an.....

c) Dans tous les cas, on indiquera le dosage, l'âge et le mode de conservation du mortier soumis aux essais.

II. *Perméabilité.* — A. — *a*) La perméabilité des pâtes et mortiers sera exprimée par le nombre de litres d'eau écoulés à l'heure, à travers un bloc cubique de 50 centimètres carrés de face, dans les conditions ci-après :

b) L'eau destinée aux filtrations sera amenée par un tube de verre de $0^{m},35$ de diamètre et de $0^{m},11$ de hauteur, scellé verticalement à l'aide de ciment pur, sur la face supérieure du bloc posé en délit, préalablement repiquée pour mettre le mortier bien à vif. Le tube, fermé à sa partie supérieure par un bouchon en caoutchouc, sera mis en communication avec un réservoir élevé au niveau correspondant à la charge d'eau. On adoptera pour cette charge, suivant la perméabilité des mortiers, celle des hauteurs de $0^{m},10$, 1 mètre, 10 mètres, qui permettra de procéder à des constatations faciles.

c) Avant d'être mis en expérience, le bloc sera immergé dans un bac pendant 48 heures avec les précautions nécessaires pour arriver à une imbibition aussi complète que possible.

Une fois mis en expérience, le bloc sera maintenu immergé sur toute sa hauteur.

d) Le volume écoulé à l'heure sera constaté après 24 heures, 7 jours, 28 jours, 3 mois...

e) Les constatations porteront sur trois blocs semblables; on donnera les résultats moyens correspondants seulement aux deux blocs les plus concordants.

En même temps qu'on exprimera la perméabilité aux diverses époques (24 heures, 7 jours, 28 jours, 3 mois, etc.), on aura soin de faire connaître les charges ($0^m,10$, 1 ou 10 mètres) sous lesquelles on aura opéré.

B. — *a*) *L'essai normal* de perméabilité portera sur le mortier normal plastique âgé de 28 jours, conservé dans l'eau.

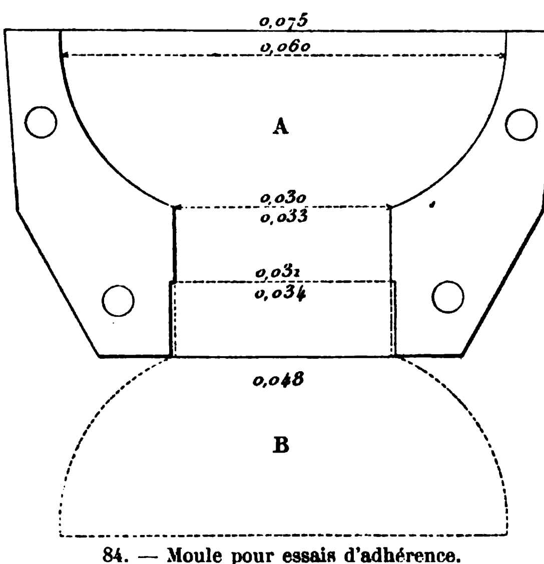
b) Pour les essais qui seraient faits sur des mortiers d'âge et de composition différents, on recommande d'employer, de préférence, des mortiers plastiques dosés à 1 : 2 et à 1 : 5 âgés de 7 jours, 28 jours, 3 mois, etc...

c) Dans tous les cas, on indiquera le dosage, l'âge et le mode de conservation du mortier soumis aux essais.

Pour les essais d'adhérence on emploie un moule dont la partie supérieure permet d'obtenir une éprouvette demi-cylindrique pouvant être introduite dans les griffes de l'appareil de traction. Il se termine par une partie droite à section carrée de $0^m,03 \times 0^m,0333$ et de $0^m,02$ de hauteur. A la partie inférieure du moule et sur $0^m,01$ de hauteur, la section est un peu plus grande, soit $0^m,031 \times 0^m,340$; un petit bloc de bronze de même dimensions, se place dans cette partie du moule qu'il remplit exactement.

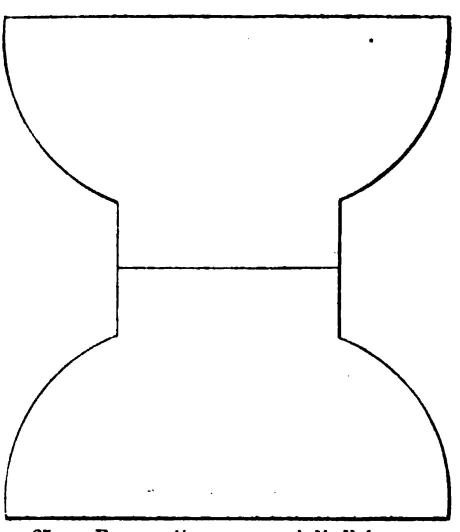
Pour préparer les pièces d'adhérence, c'est-à-dire les blocs sur lesquels on appliquera plus tard le mortier à essayer, on laisse le bloc de bronze au fond du moule, et on remplit celui-ci de mortier comprimé fortement. Le mortier est composé d'une partie de ciment portland passé au tamis de 900 mailles et de deux parties d'un sable normal préparé à l'aide de tamis de 144 et 324 mailles. On obtient ainsi un mortier qui, après avoir fait prise, présente un grain serré, uniforme, et que l'on peut dresser facilement ; avec le sable normal ordinaire, il se trouve presque toujours sur la surface des trous produits par suite de l'arrachement de grains de sable mal agglomérés.

Les blocs d'adhérence peuvent être démoulés immédiatement; on les laisse vingt-quatre heures à l'air, puis on les maintient immergés dans de l'eau douce jusqu'au moment de l'essai et au moins pendant vingt-huit jours. Quand on veut faire une expérience, on les laisse sécher et on dépolit la surface qui doit recevoir le mortier d'essai avec du papier émeri n° 3.



84. — Moule pour essais d'adhérence.
A, mortier à essayer; B, pièce en mortier faite d'avance sur laquelle on place le moule.

Pour confectionner une éprouvette pour essai d'adhérence, on se sert du même moule, mais on enlève le bloc en bronze et on le remplace par un bloc d'adhérence que l'on introduit dans le moule en le plaçant sens dessus dessous (*fig.* 84); si on n'avait pas laissé à cette partie du moule une plus grande largeur, on n'aurait pu introduire le bloc de mortier qu'après avoir usé les faces latérales, ce qui eût demandé un travail assez considérable.


85. — Eprouvette pour essai d'adhérence.

On remplit ensuite le moule avec le mortier d'essai. Celui-ci est composé de une partie de ciment ou de

chaux et de deux parties de sable normal, à moins que l'on ne désire expérimenter d'autres dosages. On gâche le mortier à consistance plastique avec la quantité d'eau strictement nécessaire pour que le mortier puisse être introduit dans le moule et qu'il le remplisse bien sans opérer de battage à la spatule ; un léger tassement à la truelle doit suffire.

On peut démouler immédiatement ou mieux après la prise, dans tous les cas, en ayant soin de ne faire subir à l'éprouvette aucun mouvement susceptible de produire le décollement du mortier.

L'éprouvette démoulée est conservée à l'air pendant vingt-quatre heures, puis on la maintient immergée jusqu'au moment de la rupture. Comme sa forme (*fig.* 85) et ses dimensions lui permettent d'être saisie par les griffes de la machine à essayer les briquettes en 8, il n'y a absolument rien à changer à cet appareil et la rupture s'opère à la manière ordinaire. L'expérience se fait donc très simplement et n'exige qu'un matériel très restreint.

On peut exécuter avec la même facilité les essais destinés à étudier l'adhérence du mortier à des matières de différente nature.

Si l'on avait à essayer du marbre, par exemple, il suffirait de faire tailler un bloc de 0,03 × 0,033 de largeur et d'une épaisseur quelconque ; une des faces seulement serait dressée. Cette pièce serait mise dans le fond du moule, le bloc de bronze étant en place, puis on remplirait le moule avec du ciment pur ; une fois le ciment pris, on aurait un bloc d'adhérence dont la surface à utiliser serait constituée par la matière à essayer.

Règles de la Commission des méthodes d'essais pour les essais d'adhérence :

1° L'essai normal destiné à comparer la force d'adhérence des divers agglomérants hydrauliques se fera de la manière suivante :

a) On préparera des blocs d'adhérence, composés d'une partie de ciment portland artificiel de la meilleure qualité, passé au tamis de 900 mailles, et de deux parties de sable quartzeux (obtenu par le concassage du quartz

bluté à l'aide de tôles perforées de 1 millimètre et de $0^{mm},50$). Provisoirement on pourra employer pour le blutage du sable quartzeux les tamis de 144 et 324 mailles qui correspondent à très peu près aux tôles perforées de 1 millimètre et $0^{mm},50$.

Le mortier sera gâché avec 9 % d'eau et comprimé très fortement dans le moule. Les blocs d'adhérence seront immergés dans l'eau douce au bout de vingt-quatre heures et ils y séjourneront jusqu'au moment de l'emploi et au moins pendant vingt-huit jours. Quand on voudra les utiliser, on les laissera sécher, puis on passera la surface d'adhérence au papier d'émeri.

b) Le mortier à essayer sera composé d'une partie de ciment ou de chaux pour deux de sable normal, en poids. Le mortier sera gâché à consistance de pâte plastique, en ayant soin d'éviter l'excès d'eau; il sera introduit dans le moule sans battage, par un simple tassement à la truelle.

Le démoulage se fera une fois la prise complètement terminée.

On fera un nombre d'éprouvettes suffisant pour en rompre six à chaque période de rupture.

Après vingt-quatre heures et, dans tous les cas, après la prise, les éprouvettes seront immergées; elles seront rompues aux dates fixées pour les essais de résistance à la traction.

2° Si l'on désire exécuter des essais avec des blocs d'adhérence composés de sables ou d'agglomérants de différentes natures, il est recommandé d'employer le procédé et le dosage indiqués en *a*.

Dans le cas où on voudra comparer l'adhérence d'un agglomérant à diverses matières, on préparera des plaques de la matière à essayer de $0,03 \times 0033$ et d'une épaisseur de quelques millimètres; une des faces seulement sera dressée et dépolie toujours de la même manière. Cette plaque sera placée dans le moule pour essais d'adhérence, et on achèvera le remplissage avec du ciment portland pur.

Le reste de l'expérience se fera comme il est dit en *b*.

Essais de déformation ou d'invariabilité de volume. — Essais à chaud. — Il y a quelques années on a préconisé les essais à l'eau bouillante pour pouvoir obtenir en peu de temps des résistances aussi élevées que celles présentées par les mortiers immergés dans l'eau, à la température ordinaire, après plusieurs mois ou même plusieurs années. On admettait

que la résistance maximum que le ciment pur est susceptible d'atteindre était obtenue au bout de 7 jours ou de 28 jours d'immersion dans l'eau bouillante. Cette prétention n'était pas justifiée et tous les essais qui ont été faits en vue de constater la résistance des mortiers de ciment pur immergés dans l'eau chaude n'ont pas donné de résultats concluants.

L'essai à l'eau chaude peut donner cependant un renseignement utile pour déceler la présence de la chaux libre dans une chaux ou un ciment. En effet, un ciment auquel on ajoute 0,5 °/₀ seulement de chaux de l'azotate calcinée très fortement, gonfle quand on le tient immergé quelques temps dans l'eau chaude à 70-80°. Un ciment qui résiste bien à cet essai est donc certainement exempt de chaux libre. C'est déjà là une donnée précieuse et facile à obtenir.

Mais si le mortier gonfle ou présente des fissures, doit-on en conclure que le ciment est certainement mauvais ?

Un ciment de composition normale, ne contenant pas de chaux en excès, mais dont la cuisson n'a pas été poussée jusqu'à la vitrification complète (1), gonfle énormément quand il est immergé dans l'eau chaude. Cependant nous avons vu que de pareils ciments donnent aux essais ordinaires de très bons résultats, complètement différents de ceux que l'on constate avec les ciments qui contiennent un excès de chaux (Voir tableau n° 8, essais 15 à 23). Ces derniers se fissurent plus ou moins profondément quand ils restent immergés dans l'eau de mer ; les mortiers conservés à l'air donnent de très faibles résistances et se réduisent parfois en poussière. Avec les ciments imparfaitement cuits, mais bien dosés et homogènes, on n'observe rien de semblable ; les mortiers conservés dans l'eau de mer ne présentent aucun signe d'altération et les éprouvettes conservées à l'air donnent des résultats entièrement satisfaisants.

L'essai du ciment pur à l'eau chaude ferait cependant con-

(1) On peut diviser les produits de la cuisson en trois catégories : 1° les incuits jaunes ou jaunes bruns ayant une densité apparente très faible ; 2° les morceaux incomplètement cuits, de couleur grise ou verdâtre, la densité apparente est encore assez faible ; 3° les morceaux bien cuits, noirs ou noir-verdâtre, de densité apparente très élevée.

damner de pareils ciments comme renfermant un excès de chaux (1).

La manière de diriger les essais, qui a été décrite par M. Le Chatelier à propos d'expériences exécutées par M. Deval (*Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale*, août 1890), nous semble préférable et susceptible de donner des indications plus utiles. Elle consiste à placer les briquettes de mortier 1 : 3 confectionnées à la manière ordinaire, dans de l'eau maintenue à 80°. On casse les briquettes au bout de 3 et 7 jours et on compare les résultats avec ceux que donnent, après 7 jours et 28 jours, les briquettes du même ciment conservées dans l'eau à la température ordinaire. Les ciments qui contiennent de la chaux libre présentent dans l'eau chaude des résistances plus faibles que dans l'eau froide; les ciments de bonne qualité présentent des résistances au moins égales, et presque toujours plus grandes que dans l'eau froide. Les ciments bien dosés et homogènes, mais n'ayant pas atteint le maximum de cuisson donnent à cet essai des résultats satisfaisants.

En Allemagne et en Suisse, on exécute plusieurs séries d'essais sur le ciment gâché pur pour constater la stabilité de volume. Il y a d'abord les essais ordinaires prescrits par les normes, qui consistent à maintenir une galette de ciment pur immergée pendant 28 jours dans l'eau ; on laisse pendant le même temps une autre galette à l'air, à la température ordinaire.

On fait également les expériences suivantes :

1° On plonge une galette dans l'eau froide et on élève la température de l'eau de manière qu'au bout d'une heure environ

(1) Nous avons observé avec des ciments contenant 2 et 3 % de chaux caustique (additionnée au ciment en poudre) les faits suivants : des briquettes immergées dans l'eau chaude se sont promptement désagrégées ; à l'eau de mer elles se sont décomposées rapidement ; les briquettes à l'air se sont réduites peu à peu en poussière. Celles qui étaient conservées dans l'eau douce, à la température ordinaire, se sont, au contraire, très bien comportées et elles n'ont pas augmenté de volume ; après plusieurs mois, on les a soumises de nouveau à l'action de l'eau chaude et on n'a observé ni fissure ni gonflement appréciable.

elle soit en ébullition. Après 4 ou 6 heures on retire la galette et on l'examine.

2° La galette est placée dans une étuve 24 heures après le gâchage du ciment; on fait monter la température jusqu'à 120° et on laisse la galette à l'étuve pendant trois heures.

3° On pétrit le ciment avec peu d'eau, de manière à en former une boule de 3 à 4 centimètres de diamètre, et aussitôt on place celle-ci au-dessus de la flamme d'un bec de Bunsen ; la flamme, d'abord faible, est augmentée progressivement de manière qu'au bout d'une heure environ la partie de la boule en contact avec elle soit portée au rouge. Quelquefois on attend que le ciment ait fait prise pour le placer sur la flamme du bec Bunsen.

Dans toutes ces épreuves le ciment ne doit pas changer de forme ni présenter de fissures (1).

La conférence de Dresde pour l'unification des méthodes d'essais avait décidé d'examiner de près cette question. M. Tetmajer, président de la 12ᵉ sous-commission, fit un rapport très détaillé sur « *les recherches des méthodes abrégées pour la détermination de l'invariabilité de volume du ciment Portland dans l'air et des autres produits hydrauliques, notamment sur l'épreuve à la cuisson et l'influence des bains chauds* ».

Les observations de M. Tetmajer, faites avec un grand soin, ont porté sur un très grand nombre d'échantillons de ciments et de chaux hydrauliques. Chaque échantillon était soumis aux épreuves que nous avons énumérées plus haut, et les phénomènes qui se sont produits ont été notés et consignés dans des tableaux qui permettent de juger de la valeur de chaque épreuve.

Comme conclusion de ses expériences, M. Tetmajer estime que pour les ciments Portland l'épreuve concluante est l'épreuve de cuisson, c'est-à-dire celle qui consiste à immerger une ga-

(1) Il faudrait ajouter à cette énumération plusieurs autres essais préconisés en Allemagne ou aux Etats-Unis ; le prof. Erdmenger, par exemple, soumet les éprouvettes à l'action de la vapeur à 20 atmosphères ; tous ces essais donnent, en somme, des résultats à peu près semblables et il nous semble que l'on peut s'en tenir au plus simple, celui à l'eau bouillante.

lette, ou une boule de ciment ayant fait prise, dans de l'eau froide et à chauffer celle-ci jusqu'à l'ébullition.

Pour les chaux hydrauliques et les ciments romains l'épreuve à l'eau bouillante ne peut donner aucun renseignement ; mais en maintenant ces produits dans un bain d'eau chaude, ou d'air chaud, à 50°, on a, au contraire, une indication suffisamment précise sur leur valeur, en ce qui concerne la stabilité de volume. Les ciments romains sont soumis à l'épreuve, comme les Portland, au bout de 24 heures ; pour les chaux hydrauliques on doit attendre 3 jours.

Les produits qui supportent bien ces épreuves peuvent être considérés comme ayant une constance de volume absolue ; ceux qui les supportent mal sont sujets à subir des dégradations plus ou moins importantes quand ils restent exposés à l'air.

M. Tetmajer a constaté sur de nombreux échantillons, des altérations, souvent très importantes, des mortiers de ciment pur qui restaient exposés à l'air ; les premiers signes de la décomposition ne commençaient quelquefois à se manifester qu'après plusieurs mois. Ces ciments, en apparence de composition normale, devaient être mal préparés et contenaient, à côté de grains trop riches en chaux, des parties trop riches en argile ; ils étaient donc tout à fait semblables à ceux qui renferment un excès de chaux et qui présentent, en effet, les mêmes caractères. Pour ces ciments, non homogènes, l'épreuve à l'eau chaude peut être tout à fait concluante, mais pour les ciments bien préparés elle le serait beaucoup moins, comme nous l'avons montré précédemment.

M. Tetmajer attribue d'ailleurs les phénomènes de destruction qu'il a observés à la présence de grains de chaux ou de particules riches en chaux disséminés dans le ciment. Pour mettre ce fait en évidence, il a mélangé avec des ciments de bonne qualité des ciments demi-cuits et incuits, dans des proportions variant de 100 : 0 à 100 : 50. Ces mélanges ont été soumis aux épreuves rapides d'invariabilité de volume ; à partir d'une teneur de 10 à 15 % de ciment demi-cuit ou de 5 % de ciment incuit, ils ont présenté des signes d'altération, et les galettes à

l'air se sont mal comportées dans un temps plus ou moins éloigné, suivant la composition du mélange.

En additionnant du ciment imparfaitement cuit à du ciment de bonne qualité, M. Tetmajer admet que l'effet produit est le même que si l'on avait mélangé au ciment de la chaux surcuite ; d'après lui, la chaux calcinée à haute température en présence de l'oxyde de fer s'éteint très lentement, la chaux des ciments incuits ou demi-cuits doit se trouver dans des conditions analogues ; la chaux pure cuite très fortement pourrait être mélangée jusque dans la proportion de 12 % avec le ciment, sans qu'il en résulte aucune altération du mortier, à condition que la chaux ait été réduite en poudre très fine.

L'emploi de ciment incuit au lieu de chaux surcuite se justifie bien, en effet, quand il s'agit de ciments non homogènes, dans lesquels les grains de calcaire sont relativement gros et mal répartis dans la masse ; ces ciments, s'il ne sont pas cuits jusqu'au commencement de fusion, renferment toujours une forte proportion de chaux libre non combinée.

Quant à la chaux vive mélangée au ciment, elle ne peut avoir aucune action nuisible parce que le carbonate de chaux pur, porté à très haute température, produit une chaux qui s'éteint rapidement ; mélangée avec du ciment à prise lente elle peut s'hydrater complètement avant la prise. Mais il en est tout autrement si le carbonate de chaux contient quelques centièmes seulement de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ; ces corps forment un fondant dans lequel la chaux se trouve englobée et celle-ci ne peut s'éteindre qu'avec une extrême lenteur. (Voir Annexe I). C'est ce qui se produit quand un ciment renferme de la chaux en excès, ou que, par suite d'un mélange imparfait des matières premières, toute la chaux n'est pas entrée en combinaison. Dans tous les cas, la chaux ne peut avoir une action destructive que si elle n'est pas combinée, et si elle ne peut s'hydrater que très lentement. Dans un ciment demi-cuit, mais homogène et bien dosé, la chaux se trouve dans un état absolument différent ; elle est entièrement combinée, ou peut s'en faut, mais elle se trouve engagée en grande partie dans des combinaisons facilement altérables par l'eau. Si on agite un ci-

ment de cette nature dans un grand excès d'eau, on observe que la quantité de chaux en dissolution est plus grande qu'avec les ciments très cuits ; la quantité d'eau combinée est également plus élevée pendant les premiers jours (Voir Annexe III), ce qui indique bien que la proportion des sels qui s'hydratent rapidement est plus importante. Ces sels sont l'aluminate et le ferrite de chaux, et il est certain qu'un ciment demi-cuit en contient une plus grande quantité que le ciment très cuit ; mais ils ne produisent en aucune façon les effets de la chaux libre ; les ciments romains en renferment beaucoup plus que les Portland demi-cuits sans qu'il en résulte aucun inconvénient. La présence du ferrite de chaux dans les ciments incomplètement cuits se manifeste par la teinte brune que prend le mortier de ciment pur quand il reste exposé à l'air ; le ferrite est décomposé par l'acide carbonique, il se forme du carbonate de chaux et de l'oxyde de fer. On peut encore déceler la présence du ferrite et de l'aluminate par l'action de la solution concentrée de chlorure de calcium (Voir annexe I).

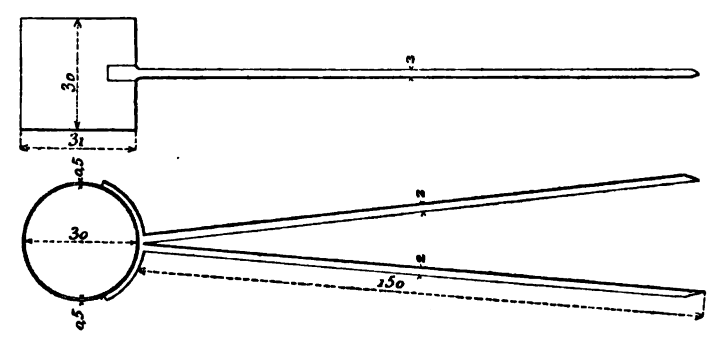
M. Tetmajer a examiné les quantités d'eau et d'acide carbonique fixées par les ciments incuits et demi-cuits ; il a reconnu que, dans les premiers surtout, la quantité d'eau combinée, d'abord assez élevée, diminue avec le temps et se trouve remplacée par de l'acide carbonique. Ce fait s'explique très bien par la présence, dans ces ciments, de quantités relativement grandes d'aluminate et de ferrite, sels instables qui s'hydratent rapidement, mais se trouvent décomposés facilement par l'acide carbonique.

Il y a peu de questions qui aient donné lieu à tant de controverses que ces essais à l'eau chaude ; la Commission des méthodes d'essais les a discutés très longuement ; M. Le Chatelier a proposé l'emploi d'un appareil simple et ingénieux qui permet d'apprécier l'importance du gonflement dans l'eau chaude (*fig.* 86).

La Commission a adopté les conclusions suivantes au sujet des essais de déformation.

A. — Les essais destinés à reconnaître les déformations déterminées par la présence des expansifs, seront effectués sur les pâtes de ciment, soit à froid, soit à chaud.

B. *Essais à froid.* — *a*) Pour ces essais, on étalera sur une plaque de



86. — Appareil Le Chatelier pour essais à l'eau chaude.

verre le mortier en forme de galette d'environ $0^m,10$ de diamètre et de $0^m,02$ d'épaisseur, amincie sur les bords.

Immédiatement après leur confection, les galettes destinées aux essais dans l'eau seront immergées dans les mêmes conditions que les éprouvettes servant aux essais de rupture (1).

Les galettes destinées aux essais à l'air, y seront également exposées dans les conditions indiquées pour les éprouvettes servant aux essais de rupture.

On notera l'état des galettes au bout des périodes de temps admises pour ces essais (7 jours, 28 jours, 3 mois, 6 mois, 1 an, 2 ans, etc.).

b) Si l'on veut mesurer les gonflements que subissent les pâtes de ciment par l'effet d'une immersion prolongée dans l'eau froide, on pourra employer des baguettes de $0^m,80$ de longueur à section carrée de

(1) L'immersion immédiate n'a pas d'inconvénient, en général, quand on fait l'essai à l'eau douce ; il en est tout autrement avec l'eau de mer en raison des réactions relativement énergiques des sels de l'eau de mer sur le ciment ; il n'est évidemment pas rationnel de plonger de la pâte de ciment, qui mettra cinq ou six heures à faire prise, dans de l'eau qui apporte à sa composition une modification importante. Il est à désirer que ce procédé soit abandonné et que l'on adopte la méthode employée maintenant partout, c'est-à-dire l'immersion 24 heures après le gâchage, quand le mortier est déjà dur.

$0^m,12$ de côté, que l'on placera verticalement dans un tube de verre de $0^m,025$ rempli d'eau.

L'allongement sera accusé par le déplacement sur un cadran, d'une aiguille actionnée par une tige, que l'on aura scellée à l'extrémité supérieure de la baguette.

C. *Essais à chaud.* — *a*) On emploiera pour ces essais, des éprouvettes cylindriques de $0^m,030$ de diamètre et de $0^m,30$ hauteur, confectionnées dans des moules en métal d'une épaisseur de $0^{mm},5$. Ils seront fendus suivant une génératrice et porteront, soudées de chaque côté de la fente, deux aiguilles de $0^m,150$ de longueur; la variation de l'écartement des extrémités de ces deux aiguilles donnera la mesure du gonflement (*fig.* 86).

b) Les moules, aussitôt remplis, seront immergés dans l'eau froide. Une fois la prise terminée et dans un délai qui n'excédera pas vingt-quatre-heures au-delà de cette prise, la température de l'eau sera élevée progressivement à 100° en un temps qui devra être compris entre un quart d'heure et une demi-heure.

La température de 100° sera maintenue pendant 6 heures consécutives et on laissera ensuite refroidir pour faire les mesures finales.

c) *Nota.* — Cette méthode d'essai à chaud n'est pas applicable aux ciments à prise rapide.

D. — Les *essais normaux* de déformation porteront sur la pâte normale de ciment.

E. — La Commission émet le vœu que des expériences prolongées pendant plusieurs années et portant sur un grand nombre d'échantillons de ciments, notamment de ciments à prise rapide, soient entreprises en vue de fournir des données plus complètes que celles dont on dispose actuellement quant aux essais comparatifs de déformation exécutés à chaud et à froid.

Conditions imposées pour la réception des ciments. — En France il existait jusqu'en 1885 plusieurs cahiers des charges contenant des exigences assez variées.

A la suite de recherches méthodiques très minutieuses poursuivies pendant plusieurs années par M. Vétillart au port de Calais, M. Guillain a dressé un cahier des charges-type qui a été adopté pour tous les travaux des ports maritimes et qui a été appliqué aussi en tout ou en partie dans plusieurs grands

travaux de ports à l'étranger. Nous donnons à l'annexe VII le texte de ce cahier des charges, tel qu'il a été établi définitivement par M. Vétillart, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées au Havre.

Le génie militaire a adopté également toutes les dispositions du cahier des charges de MM. Guillain et Vétillart, bien que les travaux du génie soient toujours exécutés à l'eau douce. Mais cette administration, en attendant de pouvoir établir un cahier des charges avec essais à l'eau douce, a pensé, avec raison, qu'un ciment satisfaisant aux conditions imposées par le service maritime des Ponts et Chaussées devait être de qualité supérieure et que les essais à l'eau de mer lui donneraient dès lors toute garantie. Le centre de la production du ciment Portland se trouvant dans le Boulonnais, l'exécution des essais ne présentait pas de difficultés, toutes les épreuves de réception étant faites dans un laboratoire installé à Boulogne-sur-mer.

Le service des travaux hydrauliques de la marine et celui des colonies ont imposé des conditions de réception à peu près semblables. Mais les essais à 84 jours ont été supprimés et, par conséquent, les clauses relatives à la suspicion n'existent plus ; comme l'obligation, pour les briquettes de ciment pur, de donner une résistance à 28 jours dépassant de 5 kilogrammes la résistance constatée à 7 jours, est maintenue, un ciment ne remplissant pas cette condition est refusé, tandis qu'il était seulement déclaré suspect avec le cahier des charges des Ponts et Chaussées.

Cette exigence n'est pas justifiée, car il est impossible de diriger la fabrication de manière que le ciment donne certainement 5 kilogrammes de plus à 28 jours qu'à 7 jours. Cela se produit très souvent, à la vérité ; mais il peut se faire qu'il n'en soit pas ainsi, même avec un ciment de toute première qualité. Les expériences faites avec le ciment pur, gâché à l'eau de mer, peuvent être influencées si facilement par plusieurs causes qu'il paraît bien rigoureux d'exiger que la résistance suive une allure aussi précise. C'est d'ailleurs la seule condition qu'un ciment de bonne qualité soit exposé à ne pas remplir, en ce qui concerne la résistance ; nous avons vu, qu'au point de vue de la

prise, un ciment irréprochable comme fabrication pouvait très bien ne pas répondre aux exigences du cahier des charges (1). Le cahier des charges de la marine et celui des colonies prescrivent en outre que le ciment ne devra pas renfermer plus de 3 % de magnésie.

En Suisse, les prescriptions normales de M. Tetmajer sur la nomenclature, la classification et l'essai des matériaux de construction, dont nous avons déjà parlé, renferment des indications intéressantes; nous reproduisons quelques-uns des passages qui ont trait spécialement au ciment Portland (2).

Les ciments Portland sont des produits obtenus par la cuisson jusqu'à commencement de vitrification, de calcaires hydrauliques ou de mélanges de matières argileuses et calcaires qui sont ensuite triturées et réduites en fine poussière. Les ciments Portland doivent, en outre, contenir au minimum 1, 7 parties de chaux par unité de substances hydrauliques.

L'addition de matières étrangères jusqu'à 2 % du poids est tolérée dans la fabrication des ciments Portland, dans le but d'augmenter certaines qualités importantes au point de vue technique, et sans nécessité de changement dans la dénomination du ciment.

Stabilité de volume. — Les matériaux hydrauliques en durcissant à l'air ou sous l'eau, doivent conserver un volume stable.

Remarques. — Pour essayer la stabilité du volume d'un produit hydraulique, on le gâche avec de l'eau, sans addition de sable, jusqu'à ce que l'on obtienne une pâte de consistance normale, puis on l'étend en galettes d'environ 10 centimètres de diamètre sur 1 centimètre d'épaisseur, sur une plaque de verre ou de métal. Pour éviter qu'elles se fendillent il faut conserver les galettes jusqu'au moment de l'essai à

(1) L'immersion de la galette de ciment pur dans l'eau de mer aussitôt après le gâchage est aussi une source de difficultés qui seraient complètement évitées si l'on adoptait la méthode employée partout, c'est-à-dire l'immersion 24 heures après le gâchage, comme nous l'avons dit plus haut.

(2) Ces prescriptions reproduisent à peu près textuellement les décisions des conférences de Munich et de Dresde pour l'unification des méthodes d'essai des matériaux de construction.

l'abri des courants d'air et de l'action des rayons du soleil, en les plaçant, par exemple, dans une caisse qu'on maintient humide. Au bout de 24 heures, en tous cas après la prise, on introduit sous l'eau deux galettes de chaque espèce de produit. Pour les ciments Portland et les ciments de laitier, on soumet en outre deux autres galettes à l'essai de torréfaction. A cet effet, les deux galettes sont placées sur une plaque de métal unie dans une étuve pendant environ trois heures et, en tout cas, une demi-heure à partir du moment où la température atteint environ 120° C., c'est-à-dire après laquelle le dégagement de la vapeur d'eau a cessé.

Si les galettes placées sous l'eau présentent des déformations ou des fentes radiales, allant en s'élargissant de l'intérieur vers l'extérieur, cela indique indubitablement un travail de désagrégation du produit hydraulique.

Si les galettes faites avec un ciment et soumises à l'étuvage présentent des déformations, ce ciment ne devra pas être employé pour des travaux à l'air. En l'employant sous l'eau ou dans des fondations humides, l'essai des galettes mises sous l'eau est concluant, et l'on doit surtout en attendre le résultat lorsque l'essai de torréfaction laisse des doutes sur la stabilité de volume.

Finesse de mouture. — Le ciment Portland ne doit pas laisser plus de 15 % de résidu sur un tamis de 900 mailles par cm^2. Le diamètre des fils du tamis de 900 mailles doit être de 1/10 de millimètre.

Essais de résistance. — L'énergie des matériaux hydrauliques doit être déterminée par l'examen des conditions de résistance d'un mélange avec du sable. On prend comme mélange normal celui d'une partie (en poids) de matière et de trois parties (en poids) de sable normal.

L'essai ordinaire qui sert à contrôler la qualité est l'essai à la traction ; il sert à vérifier la régularité des produits livrés et se fait sur des briquettes en forme de huit d'une section de rupture de 5 cm.

L'essai concluant et déterminant la valeur réelle d'un produit est l'essai de l'écrasement.

Il se fait sur des cubes de 7 centimètres de côté.

Tous les échantillons servant à déterminer la résistance de traction et d'écrasement d'un produit hydraulique doivent être préparés en principe

dans les mêmes conditions de consistance, avec la même quantité d'eau et doivent être en outre de même densité. Cette dernière est déterminée par le pilonnage de 750 grammes de composition de mortier à l'état sec, au moyen de 150 coups d'un marteau de 3 kilos tombant d'une hauteur de 50 centimètres.

A partir du moment de l'addition de l'eau, la durée du brassage du mortier normal doit être fixée à *une minute* pour les ciments à prise prompte et à *trois minutes* pour les produits à prise lente ou demi-lente.

L'essai déterminant pour tous les matériaux hydrauliques est celui de 28 jours.

Remarques. — En égard aux différences caractéristiques que présentent les résistances des produits hydrauliques employés purs, il est recommandable de déterminer ces résistances en même temps que celles de mélanges de sable.

Conditions de résistance. — Le mortier normal des produits hydrauliques pilonnés mécaniquement doit donner, après une exposition à l'air pendant 1 jour, et sous l'eau pendant 27 jours, les résistances minimum suivantes :

	Traction	Ecrasement
Ciment Portland prise prompte. .	14kg,0 par cm²	130kg,0 par cm²
Ciment Portland prise lente . . .	16 ,0 —	160 ,0 —

Les prescriptions allemandes relatives aux essais des ciments sont, à très peu près, semblables à celles qui sont en vigueur en Suisse. En raison de l'importance de ces prescriptions nous avons reproduit les normes allemandes à l'annexe VII.

En Russie les mêmes règles ont été adoptées ; mais le sable normal doit être passé à trois tamis : 64, 144 et 225 mailles par centimètre carré ; il est composé d'une partie du sable qui a traversé le tamis de 64 mailles et qui est resté sur le tamis de 144 mailles, et d'une partie du sable qui a traversé le tamis de 144 mailles et qui est resté sur le tamis de 225 mailles.

Le génie militaire, en Russie, prescrit des essais au ciment pur et au mortier 1 : 3. Le ciment pur doit résister après 7 jours à 25 kilogrammes par centimètre carré. Pour le mortier 1 : 3 on se sert de sable normal passé aux tamis de 64, 144 et 225 mailles. La résistance au bout de 28 jours doit être de 10 kilogrammes, au moins, par centimètre carré.

Les conditions imposées par le génie Belge sont les suivantes :

Poids minimum de l'hectolitre de ciment mesuré sans tassement : 130 kilogrammes.

Résidu : 15 °/₀ au maximum sur le tamis de 900 mailles par centimètre carré.

Prise. — Le commencement de prise ne doit pas se manifester avant 30 minutes et la prise complète avant 3 heures.

Résistance. — Ciment pur — après 7 jours : 25 k. par cm^2
— après 28 jours : 35 k. —
Mortier 1 : 3 — après 28 jours : 15 k. par cm^2

En Roumanie, le service du génie a adopté les prescriptions suivantes :

Densité. — Le poids du mètre cube de ciment non tassé doit être compris entre 1 100 et 1 300 kilogrammes.

Finesse de mouture. — Le résidu sur le tamis de 900 mailles ne doit pas dépasser 12 °/₀.

Prise. — Le commencement de prise ne doit pas se produire avant 15 minutes ni après 60 minutes ; la prise complète doit s'effectuer au plus tôt après 3 heures et au plus tard après 8 heures.

Résistance. — Mortier 1 : 3 — après 7 jours : 10 k. par cm^2.
28 jours : 17 k.

Composition chimique. — Le ciment ne doit pas contenir plus de 1 °/₀ d'acide sulfurique, ni de sulfure en proportion dosable.

La Direction des chemins de fer roumains impose, dans son cahier des charges relatif aux fournitures de ciment, les résistances suivantes : Mortier 1 : 3 — après 7 jours : 15 kilogrammes par centimètre carré et après 28 jours : 20 kilogrammes.

CHAPITRE V

—

EMPLOI DES PRODUITS HYDRAULIQUES

Il ne suffit pas de posséder un produit hydraulique de bonne qualité, et toutes les précautions prises pour s'assurer que la chaux ou le ciment que l'on doit employer présente l'énergie et les garanties désirables deviendraient inutiles si la mise en œuvre en était faite sans discernement ou sans soins.

On est obligé de reconnaître que trop souvent on n'attache pas à cette question de l'emploi des mortiers une importance suffisante ; il en résulte des insuccès que l'on ne manque pas d'attribuer à la qualité défectueuse de l'agglomérant.

En ce qui concerne les travaux qui doivent être exécutés par des ouvriers spéciaux, l'ignorance n'est pas la cause la plus fréquente des malfaçons ; on peut l'attribuer bien souvent au désir de diminuer le plus possible le prix de revient en cherchant à donner au travail un aspect satisfaisant sans s'inquiéter de sa solidité. Dans bien des cas cependant, les ouvriers habitués à l'emploi des produits hydrauliques n'en connaissent pas suffisamment les propriétés ou s'en font des idées erronées, et ils obtiennent des résultats tantôt bons, tantôt mauvais.

Il serait à désirer que ces ouvriers puissent connaître plus à fond le métier qu'ils exercent ou qu'ils soient soumis à une direction plus éclairée.

Quand il s'agit d'ouvrages considérables dans lesquels la manière dont le travail est exécuté devient un facteur important, il est beaucoup plus nécessaire de ne pas négliger les précau-

tions qui, tout en assurant la réussite, conduisent souvent à des économies réelles.

Les points principaux dont on doit tenir compte dans tout travail à exécuter avec des produits hydrauliques sont les suivants : nature du sable, dosage du mortier, mélange à sec, quantité d'eau de gâchage, gâchage, mise en place du mortier, enfin précautions à prendre dans certains cas pour protéger le mortier pendant les premiers jours du durcissement (1).

1. Nature du sable. — La nature du sable a une très grande influence sur la qualité des mortiers, et nous insistons tout particulièrement sur l'importance du choix du sable et sur la nécessité de ne l'employer qu'après un examen attentif.

Les sables diffèrent entre eux par leur composition chimique et par leur constitution physique. Au point de vue de la composition chimique, on peut les diviser en trois catégories : les sables argileux, les sables calcaires et les sables quartzeux ou siliceux, selon qu'ils sont composés en majeure partie de l'un des trois éléments : argile, carbonate de chaux ou quartz.

On admet généralement que les sables argileux ne doivent pas être employés ou qu'ils doivent être tout au moins lavés et tamisés. Une petite proportion d'argile ne paraît pas nuisible cependant et on peut en tolérer sans inconvénient jusqu'à 10 °/₀. Les sables calcaires sont de très bonne qualité quand les grains ne sont pas friables ; mais s'ils contiennent de fortes proportions de débris de coquillage, par exemple, ou de grains de calcaire tendre, ils ne peuvent donner que d'assez médiocres résultats. Les sables composés en majeure partie de quartz doivent être préférés à tous les autres (2).

(1) Voir : Sur la compacité des mortiers hydrauliques, par M. R. Feret. — *Annales des Ponts et Chaussées*. — Juillet 1892.

(2) Voir sur l'influence de la composition chimique des sables les expériences de M. Alexandre, *Annales des Ponts et Chaussées*, septembre 1890. Pour les travaux à la mer on doit éviter avec le plus grand soin l'emploi de sables argileux.

Un sable peut aussi contenir des impuretés telles que de l'humus, de la vase, des matières organiques, etc... Il est évident que ces matières doivent être éliminées aussi complètement que possible.

En ce qui concerne l'aspect physique, les sables sont composés de grains anguleux ou arrondis, enfin ces grains sont de différentes grosseurs.

Nous avons déjà indiqué quelle est l'influence de la nature du sable sur la résistance des mortiers et nous avons vu que les sables de moyenne grosseur et les gros sables donnent de meilleurs résultats que les sables fins.

Il ne faudrait pas cependant s'exagérer l'importance de la nature du sable. Si ce n'est quand il s'agit de travaux à la mer, dans lesquels le rôle du sable est très important, ou pour certains travaux spéciaux tels que les dallages, on peut obtenir, même avec des sables médiocres, des résistances suffisantes. L'influence du sable est naturellement d'autant plus grande que la quantité d'agglomérant mélangé avec lui est moins élevée. Quand le mortier est conservé à l'air, le rôle du sable paraît moins important que pour les mortiers immergés.

Enfin, dans le choix d'un sable il ne faut pas seulement considérer la question de résistance du mortier, on doit tenir compte également des conditions de l'emploi. Pour faciliter l'exposé des remarques que nous allons faire à ce sujet nous commencerons par diviser les sables, au point de vue de la grosseur des grains, en 6 catégories.

1° Sable très fin, passant entièrement à travers le tamis n° 50 (185 mailles au décimètre de longueur) ;

2° Sable fin, grains passant à travers le tamis n° 30 (110 mailles au décimètre), et restant sur le tamis n° 50 ;

3° Sable moyen, grains passant à travers le tamis n° 20 (75 mailles au décimètre), et restant sur le tamis n° 30 ;

4° Gros sable, grains passant à travers le tamis n° 12 (45 mailles au décimètre), et restant sur le tamis n° 20 ;

5° Gravier moyen, grains passant à travers le tamis n° 6 (20 mailles au décimètre), et restant sur le tamis n° 12 ;

6° Gros gravier, grains passant à travers le tamis n° 2 (10 mailles au décimètre), et restant sur le tamis n° 6 (1).

En général, il est préférable d'employer des sables assez réguliers comme grosseur. Pour certains travaux tels que les dallages, on ne devrait jamais se servir que de sable passé à deux tamis (nos 12 et 30).

Un dallage fait avec du sable dans lequel se trouvent des parties très fines et du gros gravier s'use plus rapidement que si le sable est bien régulier et ni trop gros, ni trop fin.

Bien que les sables à gros grains (nos 4, 5 et 6) soient préférables aux sables fins au point de vue de la résistance, ils ne peuvent pas toujours être employés avec succès. Si la quantité d'agglomérant est telle que les vides du sable soient remplis et au delà (mortier 1 pour 1 et 1 pour 2) on obtiendra de très bons mortiers avec du gros sable ; mais il n'en est pas de même si le dosage en ciment ou en chaux est peu élevé (mortier 1 : 3, 1 : 4 et 1 : 5). Dans ce cas, surtout avec le ciment qui forme une pâte fluide, celle-ci tend à se séparer du sable et le mortier n'a pas d'homogénéité.

Avec ces faibles dosages, on ne peut obtenir de bons résultats que si le mortier est gâché avec très peu d'eau et comprimé fortement.

Les sables très fins (nos 1 et 2) donnent toujours des mortiers secs et qui adhèrent mal aux pierres; il faut employer un excès

(1) En pratique, on ne rencontre pas évidemment de sables aussi réguliers comme grosseur, mais il suffit qu'ils soient composés en majeure partie de grains d'une certaine grosseur pour qu'on puisse les rapporter à une des catégories que nous avons établies pour fixer les idées.

M. R. Feret, qui a fait sur la compacité des mortiers des études très approfondies, fait remarquer que les essais exécutés sur des sables calibrés peuvent conduire à des résultats erronés ; il est certain que si l'on traite cette question au point de vue purement théorique et si l'on veut tirer des expériences des déductions rigoureuses, on ne peut se contenter d'opérer avec des sables aussi réguliers comme grosseur. Mais nous n'avons eu d'autre prétention que de donner des renseignements généraux et comme simplification nous avons admis six catégories de sable définies par leur grosseur. Tout en reconnaissant la très grande valeur et l'intérêt de recherches sur l'étude théorique des sables, nous croyons que dans la pratique on sera toujours conduit à faire des expériences directes quand on voudra être fixé sur le choix d'un sable.

d'eau considérable pour arriver à obtenir, avec ces sables, un mortier suffisamment plastique.

Quand le mortier est fait avec du sable à gros grains, la quantité d'eau doit être, au contraire, peu élevée, et dès qu'on dépasse la proportion strictement nécessaire, le mortier devient liquide et se délave.

Les sables de grosseur moyenne (n° 3) sont donc, à cet égard, préférables à tous les autres, surtout quand le dosage en ciment ou en chaux n'est pas élevé.

Les gros sables et les graviers doivent être réservés pour les mortiers à dosages riches ou quand il s'agit de faire des mortiers comprimés (pierres artificielles, béton comprimé, etc.). Quant aux sables fins, on les emploiera de préférence pour des ouvrages qui ne nécessitent ni une grande résistance immédiate, ni une imperméabilité complète. Ils peuvent convenir pour les enduits extérieurs, car, dans ce cas, le travail est plus facile et l'aspect de l'enduit plus satisfaisant que si l'on employait du gros sable.

2. Dosage des mortiers (1). Le dosage des mortiers se fait généralement en prenant un poids de ciment ou de chaux que l'on mélange avec un volume déterminé de sable. Cette manière de procéder est la seule admissible et on ne devrait jamais doser le ciment ou la chaux en volume. Il est, en effet, très difficile de mesurer deux fois de la même manière un volume de poudre et il en résulte des irrégularités dans le dosage.

Selon la nature du travail à exécuter, on mélange avec le sable des proportions plus ou moins considérables d'agglomérant. Dans certains cas, on ne cherche pas une très grande résistance; dans d'autres, on tient au contraire à ce que le mortier contienne le moins possible de vide, de manière à obtenir soit une très grande dureté, soit une imperméabilité absolue.

Pour arriver à déterminer la quantité de ciment ou de chaux à mélanger avec un sable donné, il est nécessaire de faire

(1) Voir les articles de M. Cugnin sur ce sujet, *Annales de la construction*, mars, avril, mai et juillet 1881.

quelques expériences sur le sable que l'on doit employer. Les sables, suivant la grosseur et la forme de leurs grains, présentent, sous le même volume, des poids très différents et le volume du vide existant entre les grains varie également dans des proportions assez importantes.

Ce sont les sables fins qui, sous le même volume, laissent le plus de vide entre leurs grains. A mesure que la grosseur des grains devient plus grande, le vide diminue; mais ce sont les sables mélangés qui en contiennent le moins (1).

Il est important de tenir compte sur le chantier du degré d'humidité du sable, car si on emploie tantôt du sable sec, tantôt du sable humide on aura des irrégularités de dosage qui pourront être assez grandes. Ainsi, supposons qu'avec un sable pesant, lorsqu'il est bien sec, 1 400 kilogrammes au mètre cube, on mélange 500 kilogrammes de ciment; si le même sable ne pèse plus que 1 200 kilogrammes quand il est humide, le dosage ne devrait être que de 428 kilogrammes par mètre cube ; si on ne tient pas compte de la différence de poids du mètre cube du sable humide, on se trouvera employer un mortier à 582 kilogrammes de ciment au lieu de 500.

Comme il est difficile d'employer un sable ayant toujours le même degré d'humidité, il est bon, pour diminuer les écarts de dosage, d'établir la quantité de chaux ou de ciment à mélanger au sable en prenant une moyenne entre les poids du sable sec et humide.

Quand on cherche à obtenir un mortier bien compact et aussi plein que possible, il est évident qu'il faut mélanger au sable une quantité de poudre telle qu'une fois celle-ci réduite en pâte, les vides du sable soient complètement remplis. En réalité, on ne peut arriver pratiquement à obtenir un mortier absolument plein, car, pendant sa confection et sa mise en place, il reste de l'air emprisonné dans la masse, en quantité plus ou moins grande, suivant la nature du mortier et la façon dont il

(1) A cet égard, il y a intérêt à employer un sable qui ne soit pas trop régulier ; les mélanges de gros sable et de sable fin présentent beaucoup moins de vide que les deux sables pris séparément ; nous reviendrons plus loin sur cette question.

est travaillé. On peut réduire ce vide à un mininum en tassant fortement la pâte par petites portions, mais, malgré toutes les précautions, il en reste toujours un peu. Le volume de l'air emprisonné ainsi dans les mortiers est parfois assez élevé ; avec les sables fins il peut atteindre 10 °/₀ du volume total ; il s'élève à 2 ou 3 °/₀ seulement avec les gros sables.

Les éléments à rechercher pour déterminer le dosage sont : 1° le poids d'un litre de sable; 2° le volume du vide du sable; 3° le rendement en pâte d'un poids donné de poudre, celle-ci étant gâchée avec une quantité d'eau également à rechercher.

Il est bon, comme nous l'avons dit, de prendre le poids du litre de sable bien sec et de répéter la même opération sur le sable humide. Le volume du vide existant entre les grains est plus ou moins considérable suivant le degré de tassement du sable. Dans les mortiers ordinaires à dosage normal, le sable doit prendre à peu près le même volume, qu'il soit d'ailleurs sec ou humide avant le mélange; on peut admettre que ce volume correspond à celui que le sable présente quand il est mesuré sec et sans tassement; c'est dans ces conditions, par conséquent, qu'il faudra placer le sable pour déterminer le volume du vide.

Ces expériences doivent se faire avec toute l'exactitude possible. Il est assez facile d'obtenir des résultats concordants pour le poids du litre de sable; pour obtenir la valeur du vide, l'opération est plus délicate. Quand on peut connaître le poids spécifique du sable, on calcule très facilement le vide existant dans un litre de sable. On arrive à déterminer avec une exactitude suffisante le poids spécifique du sable en versant 100 grammes de celui-ci dans une éprouvette graduée de 150 centimètres cubes, et contenant préalablement 100 centimètres cubes d'eau. La différence de niveau, après l'introduction du sable, donne exactement le volume occupé par les 100 grammes de sable ; en divisant 100 par le volume observé, on a la densité du sable.

En opérant de cette manière nous avons trouvé, sur 13 échantillons de sables assez différents comme aspect physique, des densités de 2,60 à 2,68. Ces sables étaient tous composés à peu

près exclusivement de quartz. Les sables calcaires à grains poreux donnent des résultats un peu moins élevés ; avec le sable de Seine, par exemple, nous avons obtenu 2,53 et avec le gravier de Seine, 2,58 ; le poids spécifique réel était cependant 2,69. Mais il est bien évident que l'on doit prendre pour le calcul du vide la densité apparente ; il est vrai que celle-ci même ne peut pas être obtenue exactement, car les grains de calcaire tendre absorbent immédiatement un peu d'eau, et le volume du vide existant entre les grains est de ce fait un peu exagéré.

Il s'agit ensuite de connaître le volume de pâte que donne 1 kilogramme de poudre, par exemple, gâché avec une certaine quantité d'eau. Le poids spécifique du ciment Portland étant en moyenne de 3,10, le volume absolu de 1 kilogramme de poudre est de 323 centimètres cubes. Pour obtenir le volume de la pâte, il suffit par conséquent d'ajouter à 323 centimètres cubes la quantité d'eau employée pour le gâchage. Ainsi, s'il a fallu 250 centimètres cubes d'eau pour 1 kilogramme de ciment, on aura un rendement en pâte de 250 + 323 = 573 centimètres cubes. Nous avons trouvé, par l'expérience directe, que 1 kilogramme de ciment gâché avec 250 centimètres cubes d'eau, donnait 580 centimètres cubes de pâte ; (ce qui donne pour le volume absolu des 1 000 grammes de ciment ; 580 centimètres cubes — 250 centimètres cubes = 330 centimètres cubes) et nous avons observé que si l'on emploie pour le gâchage des quantités d'eau plus élevées, le volume de la pâte augmente exactement de celui de l'eau ajoutée en plus. On peut donc admettre que, en pratique, le volume occupé par 1 kilogramme de ciment est de 330 centimètres cubes, et que l'on obtiendra le rendement en pâte d'un poids quelconque de ciment, en multipliant ce poids par 0,33, et en ajoutant au chiffre trouvé le volume de l'eau de gâchage.

Avec les chaux, le rendement en pâte s'obtient de la même manière. Mais si le poids spécifique des ciments Portland de bonne qualité varie assez peu pour que le chiffre de 0,33, que nous venons d'indiquer, soit toujours suffisamment exact, il n'en est pas de même pour les chaux, dont la densité varie de 2,60 à 2,80. Il faudra donc connaître tout d'abord le poids spéci-

fique de la chaux employée. La chaux du Teil, de bonne qualité, a une densité de 2,78. Avec une chaux analogue à celle du Teil, ayant une densité de 2,80, on a pour un 1 kilogramme de poudre un volume absolu de 357 centimètres cubes. Pour gâcher une pareille chaux, à consistance de pâte ferme, il faut 500 centimètres cubes d'eau ; le rendement en pâte devrait être 357 + 500 = 857 centimètres cubes. L'expérience directe donne un résultat un peu plus élevé : 870 centimètres cubes, à cause des bulles d'air qui restent emprisonnées dans la masse, en plus grande quantité que dans les mortiers de ciment Portland. De même que pour les ciments, le volume de pâte augmente de toute la quantité d'eau ajoutée pour le gâchage. La quantité d'eau nécessaire pour réduire la chaux en pâte est très variable suivant la qualité des chaux. Ainsi la chaux du Teil demande 50 °/₀ d'eau environ ; un échantillon de chaux de Beffes en a demandé 83 °/₀. Avec de la bonne chaux de Tournai, il en faut 50 à 60 °/₀.

Il ne reste plus maintenant qu'à chercher la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage du mortier ; elle varie avec la nature du sable et avec le dosage en ciment ou en chaux. Quand le dosage en ciment est peu élevé, 250 à 350 kilogrammes par mètre cube de sable, par exemple, la quantité d'eau de gâchage peut s'élever à 100 °/₀ du poids du ciment, avec un sable moyen. Avec le dosage normal, de 500 à 600 kilogrammes par mètre cube de sable, la proportion d'eau peut varier de 60 à 80 °/₀ quand on emploie des sables fins, et de 30 à 40 °/₀ pour les gros sables. L'écart est moins considérable si le mortier est comprimé : il faut alors 30 à 40 °/₀ d'eau du poids du ciment avec les sables fins et 23 à 28 °/₀ avec les gros sables.

Les sables à grains poreux demandent plus d'eau que les sables siliceux qui n'absorbent pas l'eau.

La quantité d'eau nécessaire pour le gachàge ne peut donc se déterminer que par une expérience directe. On prendra pour faire cet essai un mortier composé, pour 1 litre de sable, de 500 à 600 grammes de ciment ou de 300 à 400 grammes de chaux, et on ajoutera l'eau jusqu'à ce que l'on ait obtenu la consistance voulue. Nous admettons que l'eau introduite dans le mortier est tout entière destinée à réduire le ciment ou la chaux en pâte.

On pourrait diviser la quantité d'eau en deux parties : l'une destinée à réduire le ciment ou la chaux en pâte serait toujours la même, soit 250 centimètres cubes pour 1 kilogramme de ciment et 500 centimètres cubes pour 1 kilogramme de chaux du Teil ; l'autre partie serait plus ou moins considérable suivant la nature du sable. Ces deux manières d'opérer donnent des résultats semblables, et la première nous a paru plus simple. Dans le cas où l'on emploie un sable à grains poreux, il faudrait, pour arriver à une donnée exacte, connaître la quantité d'eau absorbée par les grains, et qui, évidemment, ne doit pas être comptée comme eau de gâchage.

Ces éléments une fois acquis : poids du litre de sable, volume du vide, quantité d'eau de gâchage pour 100 grammes de ciment ou de chaux, rendement en pâte de la poudre gâchée avec la quantité d'eau déterminée précédemment, le calcul est des plus simples. Prenons, par exemple, un sable dont le poids du litre est 1 300 grammes, le volume du vide 506 centimètres cubes ; il faut, pour gâcher le mortier de 500 à 600 grammes de ciment pour 1 litre de sable, 50 % d'eau du poids du ciment ; 1 kilogramme de ciment gâché avec 500 centimètres cubes d'eau donne un volume de pâte de 330 + 500 = 830 centimètres cubes.

Comme il faut obtenir 506 centimètres cubes de pâte pour remplir les vides du sable, la quantité de ciment nécessaire sera $\frac{506}{830} \times 1000 = 610$ grammes ; et la quantité d'eau de gâchage $610 \times \frac{500}{1000} = 305$ centimètres cubes.

Comme vérification, il est évident que si l'on prend le volume occupé par les 1 300 grammes de sable, les 610 grammes de ciment et les 305 grammes d'eau, on doit arriver à un volume total de 1 000 centimètres cubes. En effet, la densité du sable étant de 2.63 et celle du ciment de 3,10, on a :

$$\frac{1300}{2,63} + \frac{610}{3,10} + 305 = 996 \text{ (1)}.$$

(1) On n'arrive pas exactement à 1 000 parce que dans le calcul du rendement on a pris pour le volume occupé par 1 000 grammes de ciment le chiffre de 330 centimètres cubes qui correspond à une densité de 3.03, tandis que la densité réelle est en moyenne 3.10.

Ce chiffre représente le volume absolu des éléments qui entrent dans le mortier ; le volume réel du mortier est plus considérable à cause de l'air emmagasiné pendant le gâchage et la mise en place du mortier, comme nous l'avons fait remarquer précédemment.

Il faut observer, en outre, que la quantité d'eau employée pour gâcher le mortier dépasse toujours celle qui est nécessaire pour que l'hydratation de l'agglomérant soit complète ; une partie seulement de l'eau de gâchage est fixée ultérieurement au moment de la prise du ciment ou de la chaux et pendant leur durcissement ; l'autre partie, qui n'était utile qu'au moment du gâchage pour permettre de donner au mortier la consistance nécessaire, se trouve expulsée ensuite en laissant des vides disséminés dans la masse du mortier.

D'après de nombreuses expériences exécutées sur des mortiers conservés dans l'eau depuis plusieurs années, nous avons constaté que la quantité d'eau combinée s'élève, en moyenne, à 20 et 22 °/₀ du poids du mortier de ciment pur, soit 25 à 28 grammes d'eau pour 100 grammes de ciment (Voir annexe III, quantité d'eau fixée par les chaux et les ciments). Avec les chaux, les résultats sont très variables ; quand la chaux est de bonne qualité, on peut admettre que la quantité d'eau fixée atteint 15 à 18 °/₀ du poids du mortier de chaux pure, soit 17 à 22 grammes d'eau pour 100 grammes de chaux.

Pour déterminer le vide réel pouvant exister dans un mortier après durcissement, nous avons confectionné des mortiers à des dosages variant de 250 à 1 000 grammes de ciment ou de chaux pour un litre de sable, et nous avons répété l'expérience sur trois sables de grosseurs différentes (quartz concassé nos 2, 3 et 5). Pour chaque essai nous avons déterminé le volume absolu des éléments entrant dans la confection du mortier ; la différence entre le résultat obtenu ainsi et le volume réel du mortier a donné la valeur du vide existant au moment de la mise en place du mortier et provenant, soit de l'insuffisance de la pâte dans le cas des mortiers maigres, soit de l'air emprisonné dans la masse pour les mortiers riches. La quantité d'eau susceptible de se combiner pendant le durcisse-

ment étant retranchée de celle employée au gâchage, on a obtenu également le volume du vide provenant de l'eau en excès et existant après dessiccation du mortier (1) (Tableau n° 21).

Les résultats de ces essais mettent bien en évidence l'influence de la nature du sable sur la qualité des mortiers. On remarque principalement qu'il n'est guère possible d'arriver à obtenir un mortier plein avec du sable fin, quand le gâchage se fait à la consistance ordinaire, puisque le dosage de 1 000 kilogrammes de ciment pour 1 mètre cube de sable donnerait encore un vide s'élevant à 18 % du volume total du mortier.

Avec le gros sable, on arrive, avec un dosage modéré, à confectionner des mortiers ne contenant presque pas de vide. Quand le mortier est gâché avec peu d'eau et comprimé fortement, le désavantage du sable fin n'est plus aussi marqué.

Les essais du tableau n° 21 font encore voir bien nettement que les mortiers de chaux, quel que soit le dosage employé, sont toujours très poreux. Avec des chaux lourdes, de très bonne qualité, le vide ne paraît pas pouvoir être abaissé au-dessous de 20 % du volume total et il s'élève dans certains cas jusqu'à 41 %. Les chaux légères donneraient des résultats encore plus défectueux. Ainsi, avec une chaux légère demandant 83 % d'eau de gâchage et présentant un rendement en pâte de 1 210 centimètres cubes, le poids spécifique de la poudre étant de 2.70, le vide, après dessiccation du mortier, est de 640 centimètres cubes, soit 52 % du volume total.

Un mortier poreux n'est pas nécessairement perméable (2) et il faut remarquer en outre que les vides, quand ils ne sont pas très nombreux, se bouchent assez rapidement soit par les impuretés apportées par l'eau qui les traverse, soit par la formation du carbonate de chaux. Dans les mortiers composés de 3 parties de sable pour 1 de ciment, nous avons constaté des

(1) Des expériences faites en confectionnant des échantillons de mortiers à différents dosages et en les pesant de temps en temps nous ont fait voir que les chiffres déterminés par le calcul étaient aussi voisins que possible de la réalité.

(2) Voir sur ce sujet les articles de MM. Durand-Claye et Debray. *Annales des Ponts et Chaussées*, mai 1888.

quantités d'acide carbonique s'élevant jusqu'à 20 % du poids du mortier de ciment pur. On peut donc, dans bien des cas, ne pas attacher une importance très grande au vide en lui-même ; mais quand il est assez élevé, comme dans le cas des sables fins, ou des gros sables avec des dosages faibles en ciment, il y a tout lieu de penser qu'il se trouve inégalement réparti ; le mortier présente ainsi des points faibles et manque d'homogénéité (1).

En résumé, nous pensons que la quantité de ciment à mélanger à un mètre cube de sable doit être, en général, de 600 kilogrammes, quand on recherche une résistance élevée ou une compacité suffisante pour que les mortiers ne puissent pas être traversés par l'eau (2).

Pour les travaux à la mer, il est maintenant bien établi que les mortiers doivent être aussi imperméables que possible ; on peut donc considérer le dosage de 600 kilogrammes comme un minimum ; l'emploi des sables fins ne doit être toléré que dans le cas de nécessité absolue et à la condition que le dosage en ciment soit augmenté.

Quant aux chaux hydrauliques, la quantité qui donne le meilleur résultat paraît être 350 à 450 kilogrammes par mètre cube de sable (poids moyen). C'est d'ailleurs le dosage qui est généralement employé en pratique.

Les sables que l'on emploie ordinairement sur les chantiers ne sont pas aussi réguliers, comme grosseur de grains, que ceux

(1) M. Alexandre arrive à des conclusions analogues ; il a constaté que pour des mortiers aux dosages de 250, 400 et 550 kilogrammes de ciment pour un mètre cube de sable, gâchés à la consistance ordinaire, et avec des sables de grosseurs différentes, le vide total variait de 24 à 33 %.

(2) Le dosage de 600 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable ne peut s'appliquer, bien entendu, qu'à une poudre assez finement moulue. Nos essais ont été faits avec du ciment ne laissant que 5 % de résidu sur le tamis de 900 mailles. On trouve encore dans le commerce des ciments qui laissent sur ce tamis 18 à 20 % de résidu ; les grains qui le constituent sont assez volumineux pour qu'ils puissent être considérés comme du sable ; on doit alors augmenter le dosage d'une quantité au moins égale à celle du résidu sur le tamis de 900 mailles. Si l'on a trouvé, par exemple, 20 % de résidu, le dosage, au lieu d'être de 600 kilogrammes, devra être porté à 720 kilogrammes. Avec un ciment fin, on peut s'en tenir à la quantité strictement nécessaire pour remplir les vides du sable.

dont nous nous sommes servis pour nos expériences; ils doivent présenter, par conséquent, un peu moins de vide. Nous avons vérifié en effet, sur des sables de différentes provenances, pris sur les chantiers, que le vide, pour 1 litre de sable, était compris entre 400 et 460 centimètres cubes, et que, comme l'indiquent les résultats du tableau n° 22, les dosages devaient varier de 500 à 600 grammes de ciment pour un litre de sable (poids moyen), sauf pour les sables contenant d'assez fortes proportions de grains fins.

En mélangeant ensemble des sables de différentes grosseurs on peut, comme nous l'avons déjà fait remarquer, arriver à obtenir un sable contenant très peu de vide, parce que les grains fins peuvent se loger dans les interstices existant entre les gros grains.

Les sables mélangés employés pour la confection des mortiers maigres donnent des résultats plus satisfaisants que les sables bien réguliers ; le mortier est plus compact, plus plastique et d'une densité plus élevée ; l'augmentation de résistance qui en résulte est surtout remarquable dans le cas où le sable contient une certaine proportion de parties très fines, comme le feront voir les expériences suivantes :

	Désignation des sables	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par cm² mortier 1 : 3		
				7 jours	28 jours	3 mois
				kg.	kg.	kg.
Quartz concassé	Mélange des n°s 2 et 3. . . . . *a.*	10	2,14	15,2	23,1	27,6
	— — 2, 3 et 4. . . . . . *b.*	10	2,18	16,1	23,0	30,2
	— — 2, 3. 4 et 5. . . . . *c.*	9	2.23	18,0	26,7	34,1
	— — 2, 3, 4, 5 et 6. . . . *d.*	8,5	2,26	22,3	29,5	36,9
	Mélange *d* avec 10 °/₀ de sable n° 1. . .	8,5	2,30	25,7	37,5	43,5
	— — 20 °/₀ — . . .	8,5	2,29	27,5	36,1	45,6
	Sable normal (n° 3).	10	2,14	15,6	22,1	26,5
	Sable normal avec 10 °/₀ de sable n° 1. .	10	2,21	17,5	25,0	32,8
	— — — 20 °/₀. — . . .	9,5	2,25	22,2	32,5	40,4
Sable naturel	Mélange *a*	8,5	2,25	11,6	16,5	20,9
	— *b*	8,2	2,26	12,5	16,9	18,5
	— *c*	7,5	2,31	15,7	19,7	23,0
	Mélange *c* avec 10 °/₀ de sable n° 1. . .	8,0	2.33	16,1	22,2	25,5
	— — 20 °/₀ — . . .	8,0	2,30	17,4	21,2	26,1

L'augmentation de résistance est moins sensible avec le sable naturel, mais elle est encore assez importante.

Quand le dosage en ciment est élevé, il n'y a plus d'intérêt à employer un sable mélangé ou contenant une légère proportion de poussière siliceuse ; les résultats que nous allons exposer mettront ce fait en évidence.

Désignation des sables	Composition du mortier Ciment-sable	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré à la traction			
				7 jours	28 jours	3 mois	1 an
				kg.	kg.	kg.	kg.
1. Quartz concassé, tout venant	1 : 1	15,5	2,21	23,0	36,4	42,9	47,7
Poids du litre : 1 500 gr. vide : 430 cm³ .	1 : 3	12,5	2,14	13,7	19,5	28,0	31,9
2. Même sable, restant sur le tamis de 900m .	1 : 1	14,5	2,24	26,1	31,1	40,0	48,1
Poids du litre : 1 450 gr. vide : 449 cm³ .	1 : 3	12,5	2,08	10,6	16,8	24,5	29,7
3. Même sable, restant sur le tamis de 324m .	1 : 1	14,5	2,24	24,6	39,7	44,6	51,1
Poids du litre : 1 400 gr. vide : 468 cm³ .	1 : 3	12,5	2,08	11,5	19,5	26,2	30,0
4. Même sable, restant sur le tamis de 120m .	1 : 1	14,2	2,25	28,1	33,4	41,9	44,6
Poids du litre : 1 400 gr. vide : 468 cm³ .	1 : 3	12,5	2,05	9,6	18,6	25,2	29,6

Désignation des sables	Composition du mortier Ciment-sable	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré à la compression			
				7 jours	28 jours	3 mois	1 an
				kg.	kg.	kg.	kg.
1. Quartz concassé, tout venant	1 : 1	15,5	2,21	181,7	276,7	386,7	433,3
Poids du litre : 1 500 gr. vide : 430 cm³ .	1 : 3	12,5	2,14	75,0	170,0	260,0	320,0
2. Même sable, restant sur le tamis de 900m .	1 : 1	14,5	2,24	181,7	306,7	356,7	415,0
Poids du litre : 1 450 gr. vide : 449 cm³ .	1 : 3	12,5	2,08	58,3	121,7	196,7	240,0
3. Même sable, restant sur le tamis de 324m .	1 : 1	14,5	2,24	201,7	283,3	373,3	456,7
Poids du litre : 1 400 gr. vide : 468 cm³ .	1 : 3	12,5	2,08	68,3	125,0	183,0	233,0
4. Même sable, restant sur le tamis de 120m .	1 : 1	14,2	2,25	206,7	320,0	400,0	433,3
Poids du litre : 1 400 gr. vide : 468 cm³ .	1 : 3	12,5	2,05	55,0	108,3	180,0	250,0

NOTA. — Les mortiers ont été gâchés à la consistance ordinaire du chantier ; ils n'ont pas été comprimés dans les moules. — Le sable n° 1 contenait environ 20 % de poussière passant à travers le tamis de 900 mailles.

Quand on emploie un dosage riche en ciment, un sable irré-

gulier ne procure donc pas une augmentation de résistance, mais il conserve cependant l'avantage de donner un volume de mortier plus élevé ; comme il contient peu de vide, il reste un excès de pâte plus grand que dans le cas du sable régulier qui renferme plus de vide.

Un mortier à 1 000 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable donnerait, par exemple, environ 1250 litres de mortier avec le sable n° 1 de l'essai précédent, tandis que le rendement ne serait que de 1 150 litres avec le sable n° 4.

Malgré l'avantage qu'il y aurait à mélanger des sables de différentes grosseurs pour réduire le vide au minimum et réaliser ainsi dans certains cas une économie sur le dosage, et surtout pour obtenir un mortier plus compact et plus imperméable, il est évident que cet expédient ne pourrait être utilisé que dans des cas tout à fait exceptionnels. Voici un exemple de ce que l'on pourrait obtenir en mélangeant, en parties égales, du sable très fin, tel que le sable de Dunes, et du gros gravier :

Le sable de Dunes pèse 1 480 grammes au litre, le vide s'élève à 440 centimètres cubes.

Le gros gravier pèse 1550 grammes au litre, le vide s'élève à 400 centimètres cubes.

Le mélange des deux sables donne : Poids du litre : 1 770 g. ; vide, 320 centimètres cubes.

Supposons que l'on ait à faire un mortier au dosage de 350 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable ; en employant le sable de Dunes seul on a : mortier à 350 kilogrammes gâché avec 328 litres d'eau = volume du mortier : 1 100 litres.

Le vide total existant dans un pareil mortier s'élève à 337 litres, soit 30,6 % du volume apparent.

Avec le gros gravier seul on a : Mortier à 350 kilogrammes gâché avec 130 litres d'eau = volume du mortier 0^{m^3}, 970.

Le vide total du mortier est de 167 litres, soit 17,2 % du volume apparent.

Le mélange des deux sables donne : Mortier à 350 kilogrammes gâché avec 270 litres d'eau = volume du mortier : 1^{m^3},120 ; vide total : 237^{l}, 5, soit 21,2 % du volume apparent.

On a donc obtenu un mortier dont le vide est très peu supérieur à celui du mortier fait avec le gros sable, mais qui est beaucoup plus facile à employer et, de plus, le rendement a augmenté de 150 litres de mortier pour un mètre cube de sable.

En exposant les considérations qui précèdent, sur le dosage des mortiers, nous avons eu surtout en vue les travaux à la mer pour lesquels cette question du dosage est capitale ; pour un très grand nombre de travaux à l'air ou immergés en eau douce, la porosité des mortiers n'a pas une importance aussi grande et il ne s'agit plus que de rechercher une dureté suffisante pour assurer la conservation des ouvrages. On peut alors s'écarter notablement du dosage nécessaire pour que les vides du sable soient entièrement remplis, c'est-à-dire de celui que nous appelons dosage normal.

Le dosage à prescrire pour un travail déterminé peut varier dans des limites assez étendues et on ne peut donner à cet égard que des indications générales. Pour les maçonneries ordinaires, le dosage de 250 à 350 kilogrammes de ciment pour 1 mètre cube de sable donne des résistances largement suffisantes, si le sable est de bonne qualité et le ciment assez fin. Des dosages variant de 200 à 350 kilogrammes de ciment pour 1 mètre cube de sable ont été employés pour des travaux considérables et les résultats ont toujours été des plus satisfaisants.

Ces dosages conviennent même très bien quand il s'agit d'ouvrages qui doivent être immergés par la suite.

M. L. Le Chatelier, dans une note au sujet de la reconstruction du canal Saint-Denis, s'exprime ainsi (1) :

L'usage des mortiers maigres en ciment pour maçonnerie à l'eau était surabondamment justifié par une expérience favorable sur les 2 500 mètres de murs de quai du bassin de la Villette. L'objection qu'on y fait généralement vise le défaut d'étanchéité. Il est certain qu'un mortier à 350 kilogrammes de ciment ne peut être autre chose qu'un crible du moment qu'il en faut 500 et 600 kilogrammes rien que pour remplir les vides du sable ;

(1) *Annales des Ponts et Chaussées*, avril 1886.

mais un mortier de ciment Portland non étanche a la propriété très importante de boucher spontanément ses vides lorsqu'ils sont parcourus par l'eau. Dans les mêmes circonstances, la chaux hydraulique se délave ; la différence tient à ce que la quantité de chaux abandonnée par le mortier à l'eau chargée d'acide carbonique qui le traverse, puis déposée à l'état de carbonate, est moindre pour le ciment que pour les chaux, en raison des combinaisons chimiques et des caractères physiques qui différencient le ciment et la chaux. L'attaque d'un mortier par les eaux chargées d'acide carbonique est assez lente pour que le carbonate de chaux puisse entrer en dissolution et aller cristalliser à distance de son point de production en masse compacte et adhérente, tandis que le mortier de chaux ne donne lieu qu'à la précipitation sur place d'une masse confuse de carbonate. Cette qualité du ciment Portland est escomptée d'instinct par les maçons, mais nous ne l'avons vu nulle part définir avec précision. En voici un exemple frappant : nous avons, au mois d'août 1885, rhabillé un sas d'écluse au canal Saint-Martin, en démolissant le parement des bajoyers et du radier sur une épaisseur de 0m,50 à 0m,80 et en maçonnant brut au mortier à 350 kilogrammes. L'écluse a été remise en service quatre jours après la fin des travaux. A la partie supérieure des bajoyers, l'eau s'infiltrait dans les vides de la maçonnerie quand l'écluse était pleine, et, lorsqu'on la vidait, ressortait en filets, (nous en avons compté plus de vingt dans un mètre carré, dont quelques-uns jaillissaient avec des vitesses supérieures à 0m,50 par seconde). Au bout de deux semaines tous les orifices étaient bouchés.

Le même fait s'est produit lors de la mise en eau des nouvelles écluses du canal Saint-Denis ; il a eu la même conclusion ; mais, ce qui est plus important, leur radier avait été établi sur un terrain légèrement sourcier à l'épaisseur normale de 0m,80 et les sources captées, lors de la confection des maçonneries, de manière à émerger le plus directement possible au parement, se sont bouchées d'elles-mêmes.

A cet avantage très important dans l'espèce, mais impossible à chiffrer, à l'actif du ciment de Portland, il en faut ajouter un autre, qui lui, a été une source d'économies effectives et découle de sa rapidité de prise.

Dans les maçonneries exposées au contact de l'eau de mer le dosage de 500-600 kilogrammes s'impose absolument, car les

causes qui amènent le colmatage des mortiers en eau douce ne sont plus seules en jeu ; à l'action de l'acide carbonique, il faut ajouter celle du sulfate de magnésie qui, au lieu de produire l'étanchéité, détermine la décomposition des mortiers.

A la suite d'une série assez considérable d'essais éxécutés en vue d'observer la perméabilité des mortiers, d'après les procédés employés au laboratoire de l'école des Ponts et Chaussées, par MM. Durand-Claye et Debray et à Dieppe par M. Alexandre, nous avons fait les remarques suivantes : pour les mortiers comprimés fortement, le dosage de 450 à 550 kilogrammes est complètement étanche au bout de 2 ou 3 jours ; le mortier à 350 kilogrammes, qui laisse passer énormément d'eau pendant les premiers jours, finit par devenir étanche après quelques semaines. Les mortiers gâchés avec excès d'eau présentent des résultats assez variables ; l'imperméabilité immédiate n'est obtenue que par le dosage à 550-650 kilogrammes, mais les mortiers à 350 et 450 k., finissent aussi par ne plus laisser passer d'eau.

Quand les mortiers sont confectionnés avec du sable fin, ils sont moins perméables, dès les premiers jours, que les mortiers de sable moyen ; mais ils se colmatent moins rapidement et ce n'est qu'au bout de plusieurs mois que les mortiers aux dosages de 250-350 kilogrammes arrivent à être à peu près étanches. Les mortiers faits avec du gros sable sont extrêmement perméables pour les dosages inférieurs à 450 kilogrammes quand le mortier est comprimé, et 550 kilogrammes pour les mortiers gâchés à la consistance ordinaire. Avec des dosages riches en ciment, l'imperméabilité est complète en très peu de temps.

Les mortiers qui sont restés longtemps exposés à l'air avant d'être soumis à la filtration laissent passer l'eau pendant un temps beaucoup plus long que s'ils ont été immergés peu de jours après leur confection ; ce fait se produit même avec des mortiers assez riches. On peut expliquer ainsi comment il se fait que des mortiers à forts dosages se laissent traverser par l'eau quand ils ne sont mouillés qu'à des intervalles assez éloignés.

3. Rendement des mortiers. — A la suite des explications que nous avons données au sujet du dosage, il nous reste peu de chose à dire sur le rendement des mortiers.

Pour déterminer le rendement d'un mortier, c'est-à-dire le volume qu'un mélange composé d'une certaine quantité d'aggloмérant et de sable doit occuper une fois gâché et mis en place, il faut connaître : la densité de l'agglomérant et celle du sable ainsi que le poids qui a été employé de chacun d'eux, le volume de l'eau de gâchage. Avec ces éléments, le rendement théorique peut s'obtenir facilement. Si l'on a employé un poids P de poudre de densité D, un poids p de sable de densité d et un volume d'eau V, le volume absolu des éléments qui entrent dans le mortier est égal à $\frac{P}{D} + \frac{p}{d} + V$.

Nous avons fait voir que ce volume absolu doit toujours être augmenté d'une quantité variable avec le dosage, la nature du sable et le degré de tassement du mortier (Voir tableau n° 21.)

Il est donc assez difficile de déterminer *à priori* le rendement exact d'un mortier à dosage donné ; on pourra cependant obtenir des renseignements approximatifs, mais suffisants dans bien des cas, si on a déjà quelques indications sur le sable qui doit être employé et sur la manière dont le mortier sera travaillé. Il est toujours préférable d'avoir recours à une expérience directe toutes les fois que cela est possible.

Le rendement est beaucoup moins influencé qu'on ne pourrait le croire par la densité apparente de l'agglomérant. Les intéressés ne manquent pas de faire remarquer que les produits dont la densité est faible présentent l'avantage de donner un rendement plus considérable de mortier. Ce serait vrai si le produit était employé en pâte pure ou en mortier à dosage riche ; mais pour les dosages à 1 : 5, 1 : 3 et même 1 : 2 la supériorité du ciment léger, au point de vue du rendement, n'existe plus que dans le cas où la poudre demande une très grande quantité d'eau de gâchage, ce qui est le fait d'un produit de qualité inférieure.

La densité apparente n'a, en effet, aucun rôle dans le rendement, le poids spécifique seul est à considérer, et les différences

entre les divers produits hydrauliques sont à cet égard assez faibles pour pouvoir être à peu près négligées en pratique.

Deux ciments Portland pesant l'un 1 400 kilogrammes au mètre cube et l'autre 1 100 kilogrammes donneront exactement le même volume de pâte si on emploie pour le gâchage la même quantité d'eau. Généralement le ciment léger en demande davantage quand il est gâché en pâte pure ; si on fait un mélange contenant beaucoup de sable, la quantité d'eau de gâchage n'est plus influencée par la nature du ciment et elle est à très peu près la même, que celui-ci soit lourd ou léger. On remarque même qu'on obtient avec un ciment fin et léger, employé en mortier maigre, un rendement plus faible qu'avec un ciment lourd, moulu grossièrement ; plus la poudre est fine, en effet, et plus la pâte possède la fluidité qui lui permet de se loger dans les vides du sable. C'est pour cela que l'on arrive, même avec des chaux hydrauliques, à obtenir un rendement plus faible qu'avec du ciment Portland, pour les dosages de 250-350 kilogrammes par mètre cube de sable.

Voici quelques exemples de rendements obtenus avec divers ciments et chaux. Nous avons choisi pour la première partie de ces essais deux sables très différents ; le premier est un gros sable siliceux, le second du sable fin des Dunes. Les essais comparatifs entre le ciment Portland et les chaux hydrauliques ont été exécutés avec du sable normal.

Les mortiers ont été gâchés à la consistance ordinaire du chantier.

Comme on le voit, l'augmentation de rendement que procurent les ciments légers ne paraît sensible qu'à partir du moment où le dosage devient riche en ciment, et elle est due à peu près uniquement à l'excès d'eau qu'il faut employer pour le gâchage. Or, cet excès d'eau ayant pour effet de diminuer la résistance, l'avantage que l'on peut réaliser se trouve compensé. Les ciments légers, même quand il s'agit des Portland, donnent d'ailleurs des résultats généralement moins satisfaisants en mortiers riches que les ciments lourds.

Rendement des mortiers de ciment et de chaux

Désignation des sables	Dosage du ciment ou de la chaux pour 1 m³ de sable	Ciment Portland (1)			Ciment de grappiers (2)			Ciment de laitier (3)		
		Quantité d'eau de gâchage	Volume du mortier	Quantité de ciment ou de chaux par m³ de mortier mis en place	Quantité d'eau de gâchage	Volume du mortier	Quantité de ciment ou de chaux par m³ de mortier mis en place	Quantité d'eau de gâchage	Volume du mortier	Quantité de ciment ou de chaux par m³ de mortier mis en place
	kg.	lit.	m³	kg.	lit.	m³	kg.	lit.	m³	kg.
Gros sable	250	146	0,885	282	168	0,875	285	150	0,885	282
	450	195	0,935	481	220	0,960	468	195	0,940	478
	650	230	1,035	628	295	1,080	602	230	1,040	625
	1 000	315	1,235	809	440	1,370	729	340	1,290	775
Sable fin des Dunes	250	240	0,905	276	250	0.935	267	250	0,900	277
	450	270	0,990	454	290	1,025	439	270	0,980	459
	650	302	1,090	597	330	1,115	582	312	1,070	607
	1 000	378	1,265	790	450	1,340	746	402	1,275	784
		Ciment Portland (4)			Chaux lourde (5)			Chaux légère (6)		
Sable normal	250	195	0,890	281	232	0,870	287	286	0,910	274
	350	198	0,900	388	264	0,920	380	338	0,965	362
	450	227	0,940	473	306	0,990	454	411	1,075	417

Poids du litre non tassé : (1) 1280, (2) 970, (3) 835, (4) 1 260, (5) 800, (6) 540.

4. Mélange à sec. — Le mélange à sec du sable et de l'agglomérant doit être fait très soigneusement, car de là dépend en grande partie l'homogénéité du mortier ; s'il est imparfaitement fait, on ne peut plus, au moment où on ajoute l'eau, amener une répartition uniforme de la poudre dans toute la masse du mortier qu'à l'aide d'un corroyage énergique et très prolongé.

Le degré de siccité du sable peut avoir dans certains cas une grande importance. Avec les chaux et les ciments à prise très lente il ne paraît pas que l'emploi du sable humide soit nuisible ; il suffit de prendre la précaution de bien opérer le mélange pour que la poudre agglomérée par l'humidité du sable ne reste pas en grumeaux.

Quand on emploie des ciments à prise demi-lente ou assez rapide, il n'est plus indifférent de se servir de sable sec ou humide. Si on mélange avec du sable humide un ciment à prise

assez vive et qu'on laisse le tout en contact pendant un certain temps avant d'opérer le gâchage, la prise du mortier se trouve considérablement retardée. L'eau contenue dans le sable se porte en effet sur le ciment ; l'aluminate de chaux est hydraté rapidement et, son action ayant été annulée avant le gâchage, la prise ne peut plus se produire que par l'hydratation du silicate de chaux qui est toujours lente. Si on ne tient pas à une prise rapide, l'emploi de sable humide avec un ciment prenant un peu vite ne peut être qu'avantageux ; mais si l'on cherche à obtenir un mortier prenant rapidement, il est indispensable de n'employer que du sable sec ou, si on ne peut pas le faire, de mélanger le sable et le ciment très peu de temps avant le gâchage.

Le contact prolongé du ciment avec le sable humide ne semble pas altérer la résistance du mortier ; nous avons exécuté de nombreuses expériences pour nous en rendre compte et nous n'avons pas constaté de différences appréciables entre les mortiers confectionnés avec du sable sec ou du sable humide. (Voir Annexe IV).

5. Dosage de l'eau de gâchage. — Il est impossible d'indiquer d'une manière précise quelle est la quantité d'eau strictement nécessaire pour le gâchage. A propos du dosage des mortiers, nous avons déjà fait constater que la nature du sable et la proportion dans laquelle il entre dans le mélange, faisaient varier la quantité d'eau dans des limites très étendues. La nature de l'agglomérant joue aussi un rôle important, principalement pour les mortiers riches ; un ciment fin demande plus d'eau qu'un ciment grossièrement moulu ; contrairement à ce que l'on pense généralement, il faut moins d'eau pour gâcher un ciment frais, que pour un ciment fabriqué depuis longtemps, surtout s'il est un peu éventé.

La composition de l'eau et sa température ont aussi une certaine influence ; il faut employer moins d'eau de mer que d'eau douce pour arriver à la même consistance, etc. La proportion d'eau à adopter ne peut donc être fixée que sur le chantier et par une expérience directe.

Quand il s'agit de travaux à la mer, il y a moins d'inconvénient à gâcher le mortier avec excès d'eau qu'à employer un mortier trop sec. Celui-ci possède, en effet, une adhérence beaucoup moindre aux matériaux et comme il se tasse moins, il est plus poreux et plus accessible aux causes de destruction.

Toutefois la quantité d'eau de gâchage n'est pas seule à considérer ; il faut tenir compte en même temps de la manière dont le mortier est employé. Ainsi, un mortier gâché avec très peu d'eau et jeté dans un moule sans être fortement comprimé donnera des résultats moins satisfaisants que le même mortier gâché avec excès d'eau et employé de la même façon. Mais si l'on fait subir au premier une compression énergique, il deviendra beaucoup plus résistant que le second. (Tableau n° 15).

On peut dire, par conséquent, qu'un mortier doit être gâché avec une quantité d'eau telle que, tassé aussi complétement que possible, il prenne une certaine plasticité et que l'eau reflue à la surface.

Quand le mortier est destiné à être comprimé fortement, on doit le gâcher avec peu d'eau, de manière à lui donner l'aspect de terre humide. Pour les maçonneries ordinaires, on réduit le mortier en pâte ; la consistance de cette pâte doit être telle qu'on puisse en former une boule qui ne présente pas de crevasses et qui ne se déforme pas quand on la laisse tomber d'une faible hauteur ; le mortier ne doit pas adhérer à la main.

Dans tous les cas, les particules de ciment doivent être aussi rapprochées que possible les unes des autres et se trouver réunies autour des grains de sable. Si le mortier est gâché avec le minimum d'eau, on ne peut réaliser cette condition que par un tassement énergique ; en opérant le gâchage avec une quantité d'eau plus grande, les molécules ont une mobilité suffisante pour venir se grouper d'elles-mêmes autour des grains de sable qu'elles empâtent, et le tassement n'est plus nécessaire. Quand le mortier est gâché avec trop peu d'eau, ou si le tassement n'est pas suffisant, les particules de ciment restent éloignées les unes des autres ; si on emploie, au contraire, une quantité d'eau exagérée, celle-ci s'échappe du mortier aussitôt qu'il a été mis en place

et elle entraîne avec elle une partie du ciment ; le mortier n'a plus alors d'homogénéité.

Il est bien évident que la quantité d'eau strictement nécessaire peut varier avec les conditions mêmes dans lesquelles se trouve fabriqué le mortier. Ainsi, quand celui-ci est confectionné assez loin de l'endroit où il est employé et qu'il doit subir un transport par brouette ou par wagonnet, la proportion d'eau doit être plus élevée qu'il ne serait nécessaire, car le transport a pour effet de tasser le mortier et l'eau en excès se trouve expulsée au moment de l'arrivée au chantier. De même, si le mortier est préparé un certain temps à l'avance, il y a avantage à augmenter l'eau ; on ralentit ainsi la prise, et le mortier, rejetant une partie de son eau, arrive à être suffisamment mouillé quand on veut s'en servir.

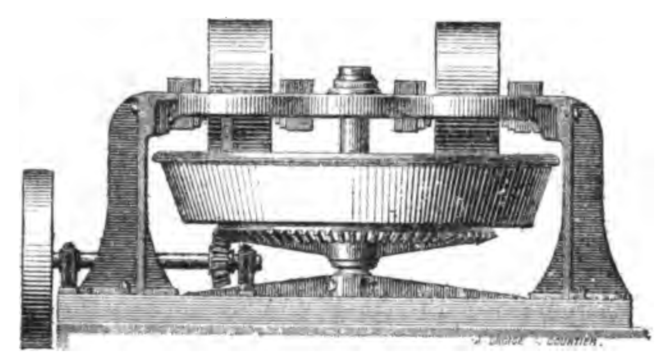
Dans le cas où le mortier se fait à bras, il est bon de n'en préparer que d'assez faibles quantités à la fois, car la trituration doit être énergique et assez prolongée ; l'eau est ajoutée peu à peu et le mélange, à chaque addition d'eau, est soigneusement remué ; on arrive ainsi à obtenir la consistance voulue sans avoir employé d'excès d'eau. Il est plus facile et plus rapide d'arriver à cette même consistance en ajoutant tout de suite une grande quantité d'eau ; mais alors le mortier ne peut pas être travaillé, ou il devient complètement liquide ; une fois mis en place, il se délave et ne conserve plus aucune homogénéité.

6. Gâchage du mortier. — Toutes les fois que cela est possible, il est préférable d'employer des moyens mécaniques pour préparer le mortier. Les appareils destinés à la confection du mortier sont assez nombreux ; ceux dont l'usage est le plus répandu sont les malaxeurs verticaux, qui brassent plus ou moins énergiquement le mélange, et les broyeurs qui, tout en malaxant la pâte, agissent également par écrasement.

Les malaxeurs verticaux sont bien connus et il est inutile d'en donner la description. Les broyeurs donnent des résultats bien supérieurs ; ils se composent d'une cuve dans laquelle tournent deux meules verticales ; ou bien c'est la cuve qui tourne et les meules sont fixes. Le mélange du sable et du ciment ou de la

chaux se fait parfaitement à l'aide de ces broyeurs et il n'est même pas nécessaire de mélanger très intimement à l'avance le sable et l'agglomérant (*fig.* 87, 88, 89).

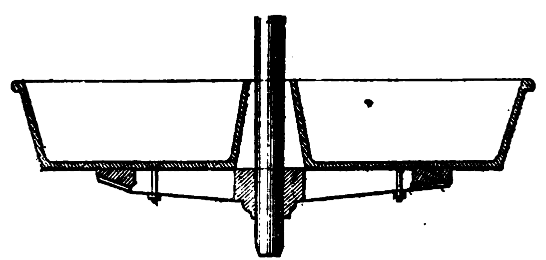
Nous trouvons dans les *Annales de la Construction* (n° du



87. — Élévation.

8 avril 1885), la description suivante du broyeur à auge tournante qui fut employé aux travaux du port d'Anvers.

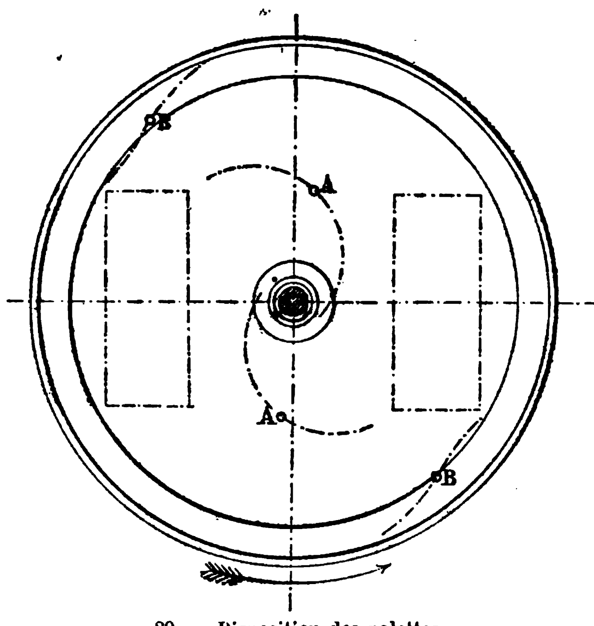
Cet appareil se compose d'un bâti en fonte et d'une auge ou cuve métallique circulaire reposant sur une roue dentée sur la-



88. — Coupe de l'auge tournante.

quelle engrène un pignon (*fig.* 87 et 88). Deux roues en fonte, montées sur un axe unique, se meuvent par frottement dans l'auge et en sens inverse de cette dernière. L'axe n'a que la liberté de monter ou de descendre entre deux glissières ou coulisses verticales de bâtis, suivant l'épaisseur de la couche du mortier à fabriquer. Dans le type courant, la cuve mobile a $2^m,15$ de diamètre et les roues broyeuses de $0^m,80$ à $1^m,60$ de diamètre ; des palettes métalliques (*fig.* 89) AA, BB placées tant

la partie centrale que sur le pourtour, ramènent constamment les matières sur la zone que parcourent les roues broyeuses.



89. — Disposition des palettes.

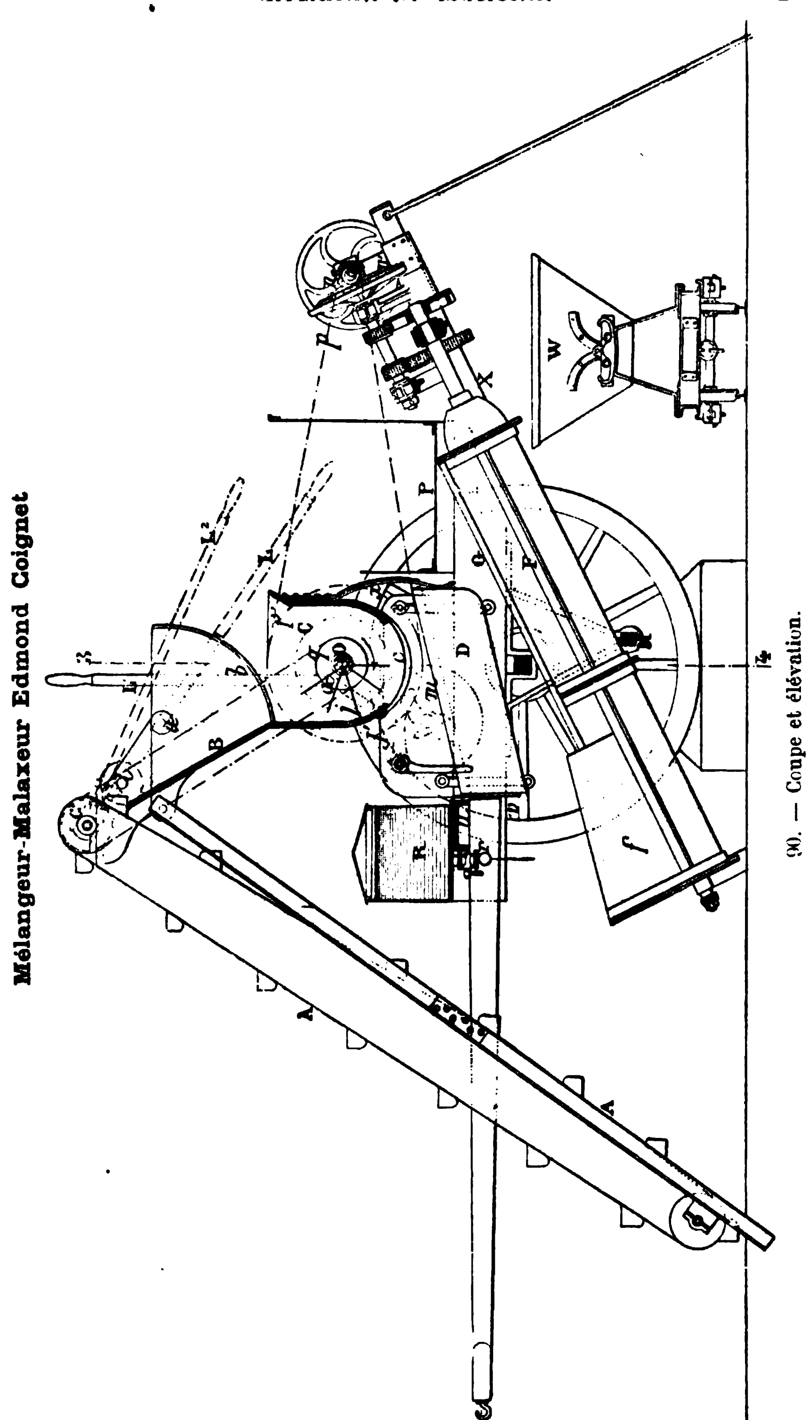
Chaque augée contient environ 0^{m^3},33 de mortier. On y introduit les matières préalablement mélangées d'une manière grossière ; l'eau nécessaire y est versée par un robinet situé au-dessus de chaque broyeur.

La trituration parfaite d'une augée exige environ 6 minutes. En tenant compte du temps passé au chargement et au déchargement, un broyeur du type dont nous parlons fournit environ 25 mètres cubes de mortier par journée de 12 heures, soit au minimum 2 mètres cubes ou 6 augées de 0^{m^3},33 par heure.

On voit que cet instrument présente les avantages du manège à roues, en ce que le mélange est effectué par écrasement et rotations simultanés. Comme débit, il est au moins égal au malaxeur ordinaire à ailettes.

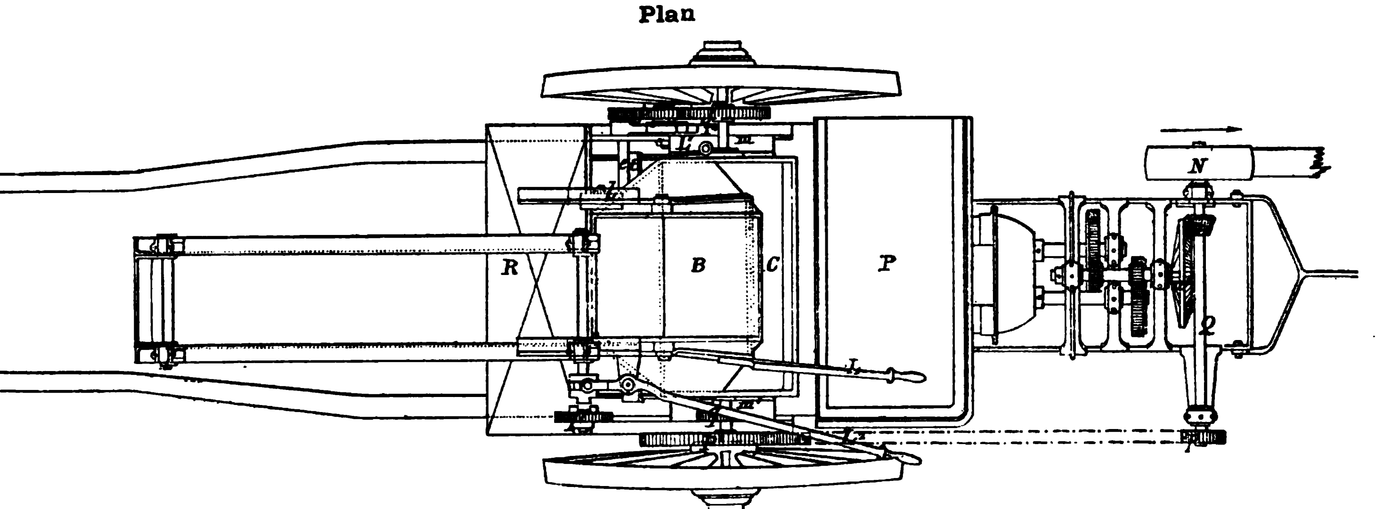
Le mélangeur-malaxeur imaginé par M. E. Coignet peut être aussi recommandé pour la préparation du mortier. Outre l'homogénéité parfaite du mélange, cet appareil assure la régularité

Mélangeur-Malaxeur Edmond Coignet



90. — Coupe et élévation.

Plan



91. — Malaxeur Coignet.

A Noria déversant le sable dans la boîte B et dont le mouvement est réglé par le levier L2.
B Boîte de la jauge pour le sable
b Paroi mobile formant porte de décharge de B, manœuvrée par le levier L autour de l'axe *a*.
C Mélangeur traversé par l'axe O portant des bras.
c Porte de décharge de C manœuvrée par le levier L1 autour de l'axe *a'*.
D Table à secousses constituant un réservoir intermédiaire qui reçoit une opération mélangée en C et la fait écouler en nappe mince au moyen de la vanne *v*
R Réservoir à robinet *r* réglant l'eau nécessaire suivant le degré de siccité du sable.
F Malaxeur à hélices conjuguées recevant en *f* les matières mélangées et mouillées et opérant le malaxage en remontant la matière jusqu'aux orifices X, d'où elle tombe dans les wagonnets W.
C Longeron du bâti sur lequel repose tout l'ensemble de l'appareil.
P Plate-forme de service pour l'ouvrier qui manœuvre les leviers L L1 L2 et qui verse dans le mélangeur C les quantités de chaux et de ciment de chaque opération.
Q Arbre recevant son mouvement d'une locomobile et le transmettant :
1° Aux hélices conjuguées du malaxeur par les roues d'angle *n* et *n'* ;
2° A l'arbre O du mélangeur C par les roues à chaîne *pp'* ;
3° A l'arbre commandant la noria A par les roues à chaîne *qq'*;
4° A l'arbre à rochet *m* par les roues *jj'* : le cliquet est fixé sur un arbre *e* qui porte également un doigt *d* ; celui-ci, en appuyant contre la barre *t*, pousse la table D contre les ressorts *x* qui le lancent contre la barre *u* en déterminant un écoulement partiel du mélange réglé par la vanne *c*.

du dosage et de la proportion d'eau de gâchage. Voici en quelques mots quel est son fonctionnement :

Le sable est enlevé par une noria qui le déverse dans une boîte de jauge disposée de telle façon que la vidange puisse se faire instantanément. Une fois la boîte remplie et arasée, le sable tombe dans le mélangeur et aussitôt on projette dans celui-ci la quantité voulue de ciment ou de chaux ; le mélange, après avoir été brassé énergiquement, tombe sur une table à secousses qui le déverse en nappe mince dans le malaxeur. L'eau, placée dans un réservoir jaugé se trouve introduite dans le mortier à la sortie du mélangeur.

Le malaxeur se compose de deux hélices enroulées autour de deux arbres tournant dans le même sens et placées dans une conche en fonte ayant la forme d'un ω. Les hélices, tout en malaxant la pâte, la remontent jusqu'à la partie supérieure de la conche qui a une inclinaison convenable, à la sortie de celle-ci, le mortier tombe dans des wagonnets qui le transportent à l'endroit où il doit être employé.

Pendant que le malaxeur traite la matière qui lui est fournie par la table à secousses, le mélangeur en prépare une nouvelle quantité et la boîte de jauge se remplit de son côté.

L'appareil est disposé de manière à ce qu'il puisse être facilement transporté et installé en peu de temps. La manœuvre nécessite 2 ouvriers (*fig*. 90 et 91).

7. Mortiers rebattus. — Il arrive fréquemment sur les chantiers que des quantités de mortiers assez grandes étant faites trop longtemps d'avance, la prise se produit avant l'emploi ; si le mortier n'est pas encore très dur, on ajoute une nouvelle quantité d'eau et on le gâche une seconde fois ; c'est ce qu'on appelle rebattre le mortier. Les opinions sur l'influence du rebattage sont très partagées ; tantôt on admet qu'il n'y a pas lieu de s'en inquiéter, tantôt, au contraire, on soutient que le mortier n'a plus aucune valeur. A la suite d'une étude approfondie de cette question, voici les conclusions que nous avons pu formuler.

Un mortier rebattu présente les caractères suivants : il est

plus plastique et il se comprime plus facilement que le mortier gâché normalement ; le mortier regâché prend très lentement, en moyenne en 8 à 10 heures ; il ne rejette pas d'eau.

Au point de vue de la résistance, quand il s'agit de mortiers gâchés à l'eau douce et comprimés fortement, le rebattage ne paraît avoir aucune influence, la résistance est même un peu augmentée, et pour certains travaux, tels que les pierres artificielles, par exemple, on pourrait recommander d'y avoir recours. Pour les mortiers gâchés à la consistance ordinaire, on constate une diminution de résistance, assez faible à la vérité ; mais il existe alors un inconvénient plus sérieux, c'est que l'adhérence aux matériaux est considérablement diminuée ; de plus, le mortier rebattu prend du retrait. C'est à cela qu'il faut attribuer en grande partie les mauvais résultats que donnent parfois les enduits lissés ; on observe au bout de quelque temps de nombreux fendillements ; le lissage a pour effet de détruire la première prise du mortier qui se trouve alors exactement dans les mêmes conditions que s'il avait été regâché.

Dans les travaux à la mer, l'emploi des mortiers rebattus doit être évité avec le plus grand soin ; la résistance est d'abord sensiblement plus faible, mais nous avons constaté surtout un fait très important, c'est que les mortiers regâchés semblent se décomposer rapidement. Il est d'ailleurs facile, pour ce genre de travaux, d'éviter la prise des mortiers avant l'emploi ; il suffit de se servir d'eau de mer pour le gâchage ; avec des produits de bonne qualité, on peut alors compter, en toute sûreté, sur une durée de prise de 10 à 12 heures. (Voir Annexe V).

8. Précautions à prendre pendant le gâchage et la mise en place du mortier. — Nous avons fait observer que le froid retarde la prise et le durcissement qui sont activés, au contraire, quand la température est élevée, mais que, dans les deux cas, la résistance finale ne paraît pas différer sensiblement.

En pratique, les différences de température n'ont pas une très grande importance ; il suffit de prendre des précautions pour éviter que le mortier se trouve exposé à une température

trop élevée au moment du gâchage et pendant la prise, ou de se mettre en garde contre la lenteur de prise par un temps froid.

Le froid n'est pas nuisible au mortier de ciment Portland. On peut sans inconvénient maçonner par une température de 5 à 6° au-dessous de zéro; le mortier est très long à prendre, mais aussitôt que la température s'élève au-dessus de zéro, il durcit très bien et arrive à donner des résistances souvent supérieures à celles des mortiers gâchés par un temps chaud.

Il résulte d'expériences exécutées par M. Dyckerhoff et par M. le docteur Böhme que les mortiers exposés à un froid, même très vif, pendant le gâchage et les premiers temps du durcissement sont un peu moins résistants au début mais que par la suite ils arrivent à une dureté égale, sinon supérieure, à celle des mortiers gâchés dans les conditions normales (1).

Le mortier de ciment ne gèle pas comme le mortier de chaux. Cependant il peut arriver que des mortiers confectionnés avec des sables très fins se dégradent un peu, quand ils ont été soumis pendant les premiers jours à un froid intense. Ces mortiers retiennent en effet une très grande quantité d'eau; mais l'altération ne se produit qu'à la surface et sur une très faible épaisseur.

Pour éviter une prise trop lente quand on emploie du mor-

(1) Les expériences exécutées par M. Alexandre sont, à cet égard, très concluantes Nous ne pouvons que reproduire le résumé et les conclusions de cet ingénieur : « L'exposition à de basses températures a pour effet de suspendre ou de retarder la prise; mais dès que la température se relève, les mortiers confectionnés et exposés à la gelée commencent à durcir et ils acquièrent avec le temps une résistance peu différente de celle des mortiers confectionnés et maintenus à la température ordinaire.

« Dans les limites où l'on opère ordinairement (0 à 18°), l'influence de la température ne se fait sentir qu'au début. Ainsi la prise est plus rapide quand la température est plus élevée; mais au bout de quelques jours, la résistance devient la même pour les mortiers confectionnés et maintenus entre 0 et 3 degrés et ceux confectionnés et maintenus entre 15 et 18 degrés.

« La confection et l'exposition des mortiers à une température très élevée, ont pour effet d'accélérer la prise et d'augmenter leur résistance au début ; mais avec le temps cette résistance est atteinte et même dépassée par celle des mortiers ayant été confectionnés et ayant durci a une plus basse température.

« Le passage brusque des mortiers à une température élevée produit dans la résistance une diminution considérable qui ne persiste que pour les mortiers déjà anciens. »

tier de ciment par un temps très froid, il est bon de se servir d'eau chaude pour le gâchage.

Lorsque la température est élevée, on doit veiller à ce que la prise ne soit pas trop rapide; on prendra soin de ne pas laisser l'eau destinée au gâchage, ainsi que le ciment, et, autant que possible, le sable, exposés au soleil. Au-dessus de 20 à 25° la prise du mortier devient très rapide quand on emploie des ciments à prise moyennement lente.

Pour terminer l'examen des précautions à prendre dans l'emploi des mortiers, nous rappellerons que les matériaux sur lesquels le mortier est appliqué doivent être mouillés pour favoriser l'adhérence, et surtout, dans le cas des matériaux poreux, pour empêcher une dessiccation trop rapide du mortier.

On ne doit pas oublier que l'adhérence est imparfaite sur du mortier déjà durci si l'on n'a soin de laver celui-ci très soigneusement (1).

Les mesures à prendre pour préserver le mortier une fois qu'il a été mis en place ne sont nécessaires que dans certains cas particuliers; mais, en général, il faut éviter que le mortier ne se dessèche trop rapidement. C'est pourquoi il est préférable de ne pas exécuter d'enduits extérieurs quand la température est élevée; la dessiccation se produit avant que la prise soit achevée et le mortier prend du retrait; cet inconvénient est surtout très marqué avec les ciments légers à prise très lente, ou quand le mortier est lissé, ce qui a pour effet de le faire prendre très lentement. Cette influence de la température est bien mise en évidence par ce fait que, de deux enduits faits par le même ouvrier et dans des conditions identiques, l'un à l'extérieur exposé au soleil et l'autre à l'intérieur dans un endroit humide et frais, le premier présente des fissures au bout

(1) Quand on désire obtenir une adhérence parfaite entre deux couches de mortier dont l'une a déjà fait prise depuis longtemps, on peut employer le procédé suivant qui donne de très bons résultats : On prépare une bouillie très claire de ciment pur ou mélangé en parties égales avec du sable fin ou de grosseur moyenne; puis on étend cette bouillie sur le mortier préalablement bien lavé; on se sert de la truelle, ou d'un pinceau, si la surface à enduire est sur un plan vertical; immédiatement après, on place la couche de mortier frais qui doit recouvrir celle qui était déjà dure.

de quelque temps tandis que le second reste parfaitement intact.

9. Résistance pratique à la compression et à l'extension des mortiers et bétons. — Malgré la quantité considérable d'essais exécutés sur la résistance des mortiers, depuis une quinzaine d'années surtout, on possède peu de données positives sur la résistance des mortiers tels qu'ils sont employés dans la pratique. Les conditions dans lesquelles on exécute les essais de laboratoire diffèrent, en effet, complètement de celles des chantiers ; les essais de laboratoire ne peuvent servir que d'indications pour comparer entre eux des agglomérants, des sables, pour faire voir l'influence des agents extérieurs sur la marche de durcissement. Il est très difficile, d'ailleurs, de donner des chiffres précis de résistance des mortiers car celle-ci peut varier avec une foule de circonstances et surtout avec le mode d'emploi.

MM. Souleyre et Anglade ont exécuté des essais très nombreux destinés à fournir des renseignements aussi exacts que possible sur la résistance des mortiers ; voici les principales conclusions de ces recherches, certainement les plus complètes qui aient été faites dans ce sens jusqu'à maintenant (1).

Pour les mortiers à 400 kilogrammes de chaux du Teil pour 1 mètre cube des meilleurs sables, la résistance limite à la traction serait de 30 kilogrammes environ par centimètre carré quand le mortier est conservé dans l'eau.

A l'air libre, en pays secs, les résistances peuvent être quelconques, tout en restant inférieures à celles des mortiers conservés dans l'eau.

La résistance du béton (mortier à 400 kilogrammes de chaux — $0^{m^3},55$ de mortier pour $0^{m^3},80$ de pierres) tend vers une limite de 13 à 14 kilogrammes par centimètre carré. A l'air sec, ou avec de mauvais sable, les résistances peuvent être très faibles et tomber même à zéro.

(1) Expériences sur les matériaux des maçonneries par M. Souleyre, ingénieur des Ponts et Chaussées, et Anglade, conducteur des Ponts et Chaussées. (Constantine, autographie L. Poulet 6, rue de France).

Pour les maçonneries à mortier dosé comme ci-dessus la résistance à l'extension doit être un chiffre voisin de 6 à 7 kilogrammes par centimètre carré.

MM. Souleyre et Anglade ont fait moins d'expériences sur les mortiers de ciment ; ils estiment que la résistance limite du mortier de Portland à 500 kilogrammes est de 50 °/₀ supérieure à celle du meilleur mortier de chaux à 400 kilogrammes conservé dans l'eau ; pour le béton on pourrait admettre une limite de 22^{kg},5 et pour la maçonnerie un nombre voisin de 14 kilogrammes.

A la compression la résistance des mortiers, des bétons et des maçonneries serait sensiblement la même et l'on aurait pour valeur minimum de la résistance des maçonneries de moellons bruts :

Au mortier de chaux hydraulique à 400^{kg}	à l'air sec	60 à 70^{kg}
	dans l'eau	90 à 100^{kg}
Au mortier de ciment Portland à 500^{kg}	à l'air ou dans l'eau	180^{kg}.

Des expériences assez nombreuses ont été exécutées en Allemagne et en Autriche sur des blocs de mortiers et de bétons prélevés sur les chantiers de construction de ponts en béton ou en ciment armé ; les chiffres de résistance à la compression varient de 200 à 350 kilogrammes par centimètre carré.

Dans le tableau n° 23 nous avons réuni des résultats d'essais exécutés sur des mortiers à différents dosages ; comme nous l'avons dit plus haut, les chiffres de ce tableau ne peuvent pas être pris en valeur absolue, ils ne doivent être considérés que comme des indications sur la valeur comparative de différents mortiers.

10. Coefficients d'élasticité des ciments et mortiers. — La détermination des coefficients d'élasticité des ciments et mortiers présente de grandes difficultés. Ces coefficients ne sont pas forcément les mêmes à la compression et à l'extension, comme l'a fait remarquer M. Souleyre. Le coefficient d'élasticité à la compression est déterminé par le rapport inverse des affaisements de cubes en ciment soumis à l'action d'une

presse hydraulique et des charges par unité de surface qui résultent de cette action (1).

Cette méthode n'est jamais bien précise; le moindre défaut de parallélisme dans les faces comprimées occasionne des erreurs grossières; de plus, les manomètres employés pour indiquer la pression subie par les cubes ne deviennent sensibles que pour des pressions considérables, de sortes que pour les faibles pressions relatives, les seules utiles à envisager en pratique, les résultats peuvent être absolument faux.

Le coefficient d'élasticité à l'extension s'obtient par l'observation des flèches de poutres en ciment posées sur deux appuis de niveau. Les formules de la résistance des matériaux permettent alors d'en déduire le coefficient d'élasticité. Cette détermination n'est pas précise non plus. Tout d'abord on admet *a priori* que les coefficients à la compression et à l'extension sont égaux, ce qui n'est pas exact comme il a été dit plus haut.

Ensuite, pour de très petites portées, les flèches ne sont pas sensibles, et dès que la portée est notable le poids propre de la poutre est très voisin de la charge qui entraîne la rupture. Dans les deux cas, il n'est pas deux échantillons qui donnent les mêmes résultats, ce qui explique les écarts assez importants entre les chiffres obtenus par les divers expérimentateurs qui se sont occupés de la détermination de ces coefficients d'élasticité.

De plus, il ne faut pas perdre de vue que la qualité des ciments, le dosage, la qualité des sables, l'âge, le mode de durcissement à l'air sec ou humide, dans l'eau froide ou chaude, etc., sont autant de causes de variabilité.

Les formules les plus complètes résumant ces expériences ont été données par Hartig. Il propose pour le ciment pur.

$$E = 100\,000\left(4,556 - \frac{183,5}{79 + t}\right)$$

E représente le coefficient d'élasticité à la compression en

(1) Voir : Mémoire sur les procédés d'essais de la résistance des pierres, ciments et autres matériaux de construction, par M. L. Durand-Claye, inspecteur général des Ponts et Chaussées. *Annales des Ponts et Chaussées* (août 1888).

kilogrammes par centimètre carré ; t représente l'âge du mortier en jours.

Pour $t = 100$ jours cette formule donne

$$E = 353.100 \text{ K}.$$

Pour les mortiers au dosage en volume de 1 : 3 (sable normal), il propose :

$$E = 100\,000\left(5,35 - \frac{421}{200 + t}\right).$$

Dans cette formule E et t ont la même signification et sont exprimés dans les mêmes unités ; les coefficients seuls sont différents.

Pour $t = 100$ jours, cette seconde formule donne :

$$E = 394.700 \text{ K}.$$

11. Béton. — Au nombre des divers procédés employés couramment dans les constructions, on peut affirmer qu'il n'en est pas qui rende plus de services et qui soit d'une application plus générale que le béton. Depuis quelques années le béton a pris une importance exceptionnelle par suite de son rôle dans les travaux de fortifications ; mais à des époques très reculées et chez tous les peuples qui possédaient à un haut degré, comme les Romains, l'art de construire, on trouve toujours l'utilisation du béton dans les ouvrages les plus considérables.

Il existe cependant une foule de travaux actuels dans lesquels on est étonné de ne pas voir figurer le béton ; on peut attribuer généralement ce fait à ce que les ingénieurs ou les architectes chargés de dresser les projets n'ont pas eu l'occasion de voir des travaux importants exécutés en béton ; mais, il faut bien l'avouer, c'est trop souvent la routine qui met le plus d'obstacle à la vulgarisation de ce procédé si parfait et si économique. Aussi ne saurait-on trop insister sur les avantages de toutes sortes que le béton offre au constructeur et sur toutes les ressources qu'il peut en tirer. Nous avons toujours vu les ingénieurs et les entrepreneurs qui avaient mis en œuvre de grandes quantités de béton ne plus vouloir employer autre chose toutes les fois que cela était possible et demander instamment à subs-

tituer le béton à la maçonnerie quand celle-ci avait été prévue. Aucun argument ne saurait être plus concluant que la faveur dont jouit le béton auprès de tous ceux qui, ayant la pratique des chantiers, ont pu apprécier ses nombreuses qualités.

Nous aurons surtout en vue, dans ce qui va suivre, le béton de ciment; c'est celui qui est le plus généralement employé et celui qui donne les résultats les plus remarquables. Il est bien entendu que dans beaucoup de circonstances le béton de chaux est suffisant et qu'il pourra obtenir la préférence quand, par suite de l'éloignement des usines de ciment, le prix de celui-ci est par trop élevé et quand on peut obtenir à des conditions avantageuses des chaux de très bonne qualité.

Le béton de ciment possède une supériorité incontestable sur celui de chaux par suite de sa rapidité de prise et de sa résistance considérable; cette extrême dureté permet soit de diminuer le dosage et d'arriver à utiliser une très faible quantité d'agglomérant par mètre cube de béton, soit d'assurer en peu de temps la solidité des ouvrages et de pouvoir construire aussi rapidement qu'on le désire (1).

On peut diviser le béton en deux classes: l'une comprend le béton proprement dit, c'est-à-dire le mélange d'agglomérant, de sable et de cailloux, c'est celui dont l'usage est le plus répandu; dans la deuxième se place le béton Coignet qui en est le type; celui-ci se compose uniquement d'agglomérant et de sable auquel on ajoute quelquefois du gros gravier ou du gravillon. Le béton ordinaire ne demande pas à être nécessairement comprimé pendant la mise en place; il est, au contraire, indispensable

(1) Nous renvoyons le lecteur pour des détails plus complets sur le béton à l'ouvrage de M. Mahiels: *Le béton et son emploi* (Liège, A. Benard, 1893) et à celui de M. A. Hallier publié à la même librairie (*Etude sur les travaux en béton de ciment* par A. Hallier, 1891).

Nous devons signaler également un ouvrage très important publié en 1892 par l'association des fabricants de ciment allemands (*Der Portland Cement und seine anwendungen im bauwesem-kommissions*, Verlag Von Ernest Toeche. Berlin, 1892). En outre des renseignements généraux sur la fabrication, les essais et les applications du ciment Portland, ce livre contient la description d'un très grand nombre d'ouvrages exécutés en béton de ciment.

de faire subir au béton Coignet un damage énergique. Il en résulte que le choix à donner à l'un ou l'autre procédé est dicté surtout par des circonstances locales ; si le prix de la main-d'œuvre est élevé, par exemple, on adoptera de préférence le béton ordinaire ; si, au contraire, la main-d'œuvre est bon marché et que, d'autre part, on ait à sa disposition du sable à bas prix et que les cailloux reviennent assez cher, il y aura tout avantage à employer le béton Coignet. Disons toutefois que si le béton de sable se prête parfaitement à la confection d'ouvrages n'exigeant pas une résistance exceptionnelle et doit être préféré à tout autre pour certains travaux comme les pierres moulées, il serait insuffisant quand il s'agit d'obtenir une très grande dureté ou une imperméabilité absolue et qu'il ne saurait être employé dans les travaux à la mer.

Béton ordinaire. — C'est en Angleterre et en Allemagne que l'on utilise le plus le béton de ciment. Citons notamment, en Angleterre, des formes de radoub entièrement en béton ; l'une d'elles, aux Victoria and Albert Docks à Londres, est construite depuis plusieurs années et elle est en parfait état ; bien que le dosage ait été assez maigre et que le béton ne soit recouvert d'aucun enduit ni parement, l'étanchéité est aussi complète que possible. Des murs de quai, des écluses, des jetées comme celle du port de Newhaven ont été construits aussi en entier au béton de ciment. Les ouvrages du canal de Liverpool à Manchester ont été en grande partie exécutés en béton de ciment Portland ; non seulement on a trouvé dans ce mode de construction une économie considérable, mais par tout autre procédé il eut été impossible de pousser les travaux aussi activement et de terminer à l'époque prévue cette œuvre gigantesque. A Liverpool les murs de quai des nouveaux bassins sont en béton jusqu'au couronnement qui seul est constitué par un rang de blocs de granit ; le dosage généralement employé est de 1 de ciment, 3 de sable et 5 à 7 de pierres, ce qui donne 180 à 210 kilogrammes de ciment par mètre cube de béton mis en place.

L'énumération des principaux ouvrages en béton qui existent en Angleterre nous conduirait trop loin ; qu'il suffise de dire que

même dans les parties du pays où l'on trouve la pierre en abondance on n'hésite pas à avoir recours au béton et quand on ne trouve pas de galets on établit des installations souvent considérables pour le cassage des pierres. Les ingénieurs et constructeurs anglais sont unanimes à reconnaître les avantages du béton de ciment au point de vue de la mise en œuvre, de la résistance et du prix de revient.

En Allemagne on a exécuté, depuis quelques années, de nombreux ponts en béton de ciment ; le plus connu est celui de Munderkingen qui a 50 mètres d'ouverture ; ce mode de construction a été préconisé par M. l'ingénieur Leibbrand qui a trouvé dans l'emploi du béton des solutions élégantes, économiques et toujours couronnées de succès. Le pont de la Coulouvrenière, à Genève, composé de deux arches de 40 mètres, est aussi un exemple remarquable de construction de pont en béton de ciment.

Nous devons citer encore le métropolitain de Budapest établi en souterrain sur une longueur de 3220 mètres ; le radier et les piédroits sont entièrement en béton ; le plafond est constitué par des fers I, espacés de 1 mètre, entre lesquels on a coulé des voûtes en béton de ciment.

Dans les travaux d'améliorations et d'agrandissements du port de Bilbao, exécutés sous la direction de l'éminent ingénieur M. de Churruca, il n'entre que du béton de ciment; dans le port extérieur seul la quantité de béton employée dépassera 300 000 mètres cubes.

La question de l'emploi du béton à la mer est très controversée en France, et cela s'explique difficilement car les ouvrages en maçonnerie ont occasionné assez fréquemment des insuccès tandis que le béton a toujours donné d'excellents résultats partout où il a été employé judicieusement.

Personne n'ignore aujourd'hui que dans les ouvrages qui doivent être exposés au contact de l'eau de mer on recherche avant tout à obtenir une imperméabilité aussi complète que possible pour empêcher la destruction du mortier par l'eau salée. Beaucoup d'ingénieurs estiment qu'avec la maçonnerie ordinaire il est impossible d'arriver à une étanchéité parfaite et, dans le cas d'un mur de quai, par exemple, ils ne voient

d'autre solution que de protéger la maçonnerie par un parement de moëllons bien assisés laissant des joints très faibles. Ce procédé est évidemment très coûteux et il peut être insuffisant car si le parement présente quelques fissures, cela suffit pour que toute la maçonnerie en arrière se trouve parcourue par l'eau de mer. Le béton permet de résoudre le problème aussi parfaitement que possible car, avec un dosage convenable, on peut obtenir une imperméabilité complète.

Le béton présente surtout l'avantage considérable de pouvoir être exécuté mécaniquement; on évite ainsi toute malfaçon, un surveillant occupé à contrôler le mélange et le malaxage suffit pour tout un chantier. Quand il s'agit de maçonnerie, au contraire, il faut un grand nombre de surveillants et, malgré tout, il est très difficile d'éviter de nombreuses imperfections.

Des essais méthodiques ont été faits au port de la Rochelle par M. Thurninger, ingénieur en chef, et MM. Coustolle et Viennot, ingénieurs des Ponts et Chaussées; ces essais sont très concluants et manifestent nettement la supériorité du béton sur la maçonnerie. Dans beaucoup d'autres ports on a fait les mêmes constatations. Aussi peut-on s'étonner que le béton ne soit pas utilisé d'une manière exclusive dans les travaux à la mer; son emploi permettrait de réaliser des économies considérables dans la construction des ouvrages et on éviterait certainement bien des mécomptes, à la seule condition, bien entendu, d'employer de bons matériaux, un dosage convenable et des appareils mécaniques bien appropriés pour la préparation du mélange; ce sont là des conditions toujours faciles à remplir.

C'est dans les travaux de fortifications principalement que l'on peut se rendre compte de la valeur tout à fait remarquable du béton de ciment Portland. L'expérience a démontré, en effet, que seul le béton pouvait résister aux nouveaux projectiles (obus torpilles chargés à la mélinite). Les anciens ouvrages recouverts simplement de terre ne présentent plus maintenant la moindre sécurité pour l'assiégé, quelques obus suffisent pour les détruire complètement; on a dû remplacer la terre par des voûtes en béton de 2 à 3 mètres d'épaisseur et dans ces conditions les ouvrages peuvent être considérés comme entièrement

à l'abri des projectiles; un obus torpille qui fait un entonnoir de plusieurs mètres cubes dans la terre ne peut entamer le béton que sur 0^m, 30 environ de profondeur. L'efficacité du béton de ciment contre les nouveaux projectiles a été si manifeste qu'en Allemagne on n'a pas hésité à protéger ainsi toutes les fortifications; dans ces travaux de bétonnage on n'a pas employé moins de quatre millions de tonnes de ciment Portland. En Belgique les 21 forts des têtes de ponts de Liège et de Namur, exécutés d'après les plans et sous la direction du général Brialmont, ont absorbé 1100000 mètres cubes de béton de ciment Portland. Dans les nombreux forts construits dans ces dernières années autour de Bucarest le béton de ciment a été à peu près exclusivement employé.

Dosage. — Des expériences exécutées avec une mesure de 1 hectolitre nous ont donné les résultats suivants : 1 hectolitre de pierres cassées à la dimension ordinaire des matériaux d'empierrement, soit 0,04 à 0,05, pèse 144 kilogrammes, la densité de ces pierres (quartz) étant de 2,63, on a pour le volume du vide, 46, 4 l.

Avec des cailloux roulés, de mêmes dimensions, le poids de l'hectolitre s'est élevé à 162 kilogrammes; on a trouvé pour la densité 2,60; le volume du vide était donc de 37,7 l. En forçant légèrement ces chiffres on peut admettre que le volume du vide contenu dans un mètre cube de pierres est de 0^{m^3},500 quand il s'agit de pierres cassées, et de 0^{m^3},400 pour les galets (1). Ce sont d'ailleurs les proportions que l'on trouve indiquées dans les ouvrages qui traitent de cette question. On

(1) De même que pour les sables qui présentent beaucoup moins de vide quand ils sont composés de grains de différentes grosseurs, on observe, lorsque les pierres ne sont pas régulières, un poids plus élevé à l'hectolitre et par conséquent un vide moins considérable. Ainsi avec des pierres cassées de dimensions irrégulières on a obtenu 154 kilogrammes pour le poids d'un hectolitre et le vide n'était plus alors que de 41. 5 l.

Nous avons obtenu avec des pierres calcaires de densité 2,69 les résultats suivants : pierres cassées de 0,07 ; poids de l'hectolitre 138 kilogrammes, vide, 48.7 l. ; mélange de pierres à 0,07 et à 0,02, poids de l'hectolitre : 145 kilogrammes, vide 46 litres.

devra donc mélanger à 1 mètre cube de pierres cassées $0^{m^3},500$ de mortier, soit une partie de mortier pour deux de pierres ; dans le cas des cailloux roulés, on prendra $0^{m^3},400$ de mortier, ou un de mortier pour deux et demi de cailloux.

Si l'on n'a pas besoin d'une résistance très considérable, on peut obtenir un très bon béton, susceptible d'acquérir une dureté relativement élevée, en prenant un mortier à 200 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable ; ce mortier donnant un rendement de 0,900 environ, le dosage du ciment par mètre cube de béton sera de 110 kilogrammes ; on pourrait même, dans bien des cas, descendre au dosage de 150 kilogrammes par mètre cube de sable, ce qui réduirait la quantité de ciment par mètre cube de béton à 85 kilogrammes environ.

Quand il s'agit de béton devant donner le maximum de résistance, comme cela est nécessaire pour les travaux de fortifications, il faut aller jusqu'au dosage de 1 000 kilogrammes par mètre cube de sable. Si nous admettons qu'un pareil mortier donne un rendement de 1,20, le dosage de ciment par mètre cube de béton sera de 416 kilogrammes, si l'on emploie les pierres cassées, et de 333 kilogrammes, avec les galets. C'est, à peu de chose près, le dosage employé dans les travaux de fortifications (1). Ces proportions peuvent être recommandées également pour les bétons coulés sous l'eau ; on emploie souvent dans ce cas deux volumes de mortier pour trois de pierres.

Pour nous rendre compte de l'influence de la nature des pierres sur la résistance du béton, nous avons exécuté deux séries d'expériences ; dans la première on s'est servi de cailloux roulés, dans la deuxième de pierres cassées. Les cailloux pesaient 1 550 kilogrammes au mètre cube et les pierres cassées 1 370 kilogrammes ; les uns et les autres avaient été passés à l'anneau de 0,04. Dans toutes les expériences on s'est servi du même sable ; celui-ci pesait 1 300 kilogrammes au mètre cube, il avait été passé au tamis n° 12. Le ciment, le sable et les pierres ont été d'abord mélangés à sec, puis on a ajouté l'eau

(1) Voir sur ce sujet l'article de M. le commandant du Génie Petitbon, inséré dans le n° de janvier-février 1888 de la *Revue du génie*.

en triturant la masse avec soin, le béton a été ensuite tassé dans des moules cubiques de 0,10 de côté. (Tableau n° 24).

Les résultats constatés au bout de 7 jours et de 28 jours montrent tout d'abord qu'avec les pierres cassées on obtient de plus grandes résistances qu'avec les cailloux roulés ; on peut voir ensuite qu'il y a avantage à augmenter la quantité de ciment dans le mortier, mais à ne pas mélanger celui-ci avec les pierres dans une proportion trop élevée ; il est préférable de s'en tenir au dosage que nous avons recommandé précédemment, c'est-à-dire d'employer la quantité de mortier suffisante pour remplir les vides des pierres.

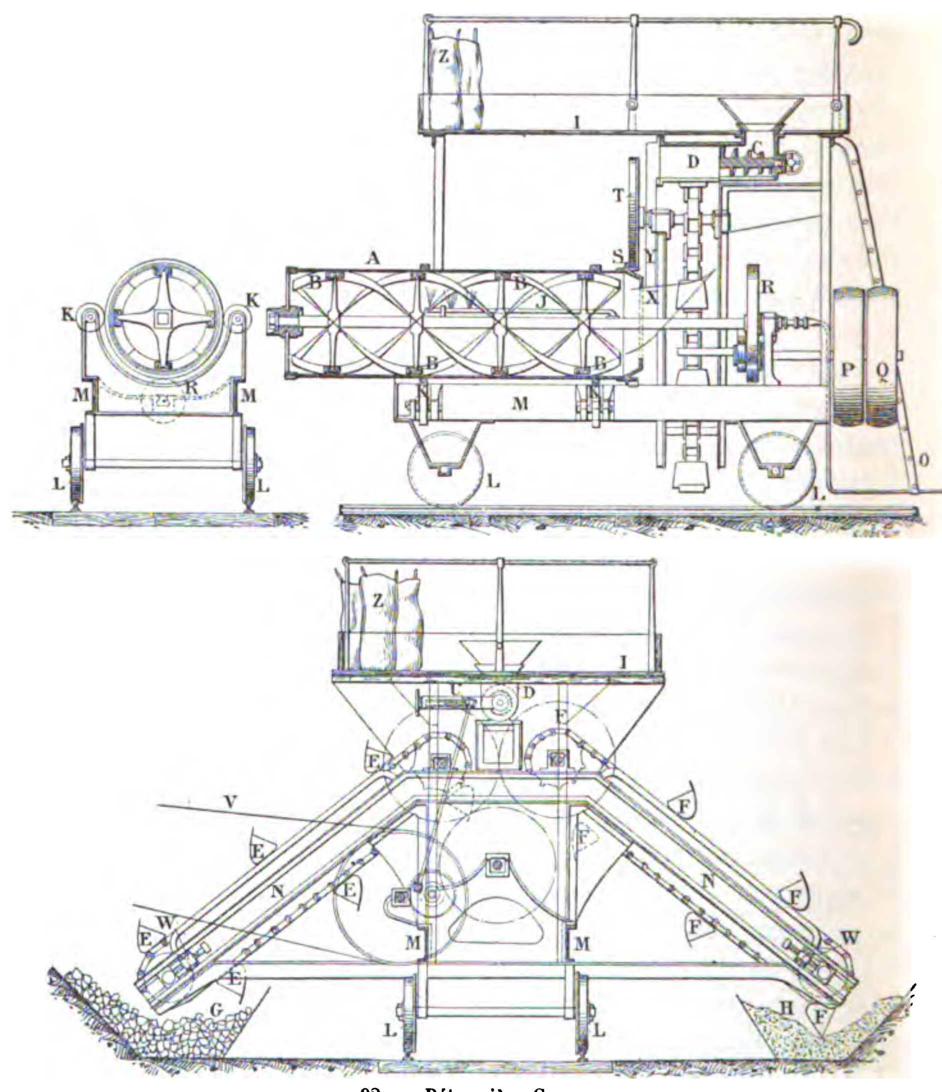
Fabrication du béton. — On peut employer divers procédés pour préparer le béton. Tantôt le mortier est confectionné à la manière ordinaire et on le mélange ensuite en proportion déterminée avec les cailloux ; le mélange se fait à bras ou dans des bétonnières verticales ; tantôt on mélange le sable et le ciment intimement, puis on ajoute les pierres et on brasse le tout énergiquement en ajoutant l'eau en même temps.

Il existe des appareils dans lesquels le mélange s'exécute mécaniquement, et avec lesquels on peut mélanger à la fois le sable, le ciment, les cailloux et l'eau.

Une des meilleures machines de ce genre est la bétonnière Carrey employée par MM. Coiseau, Couvreux et Allard à la construction des jetées du port de Bilbao. Cette bétonnière se compose essentiellement d'un cylindre horizontal tournant à 20 à 30 tours par minute ; des hélices à pas très allongé contribuent au mélange des matières et les font progresser d'une extrémité à l'autre du cylindre ; deux chaînes à godets élèvent les pierres et le sable dans des porportions déterminées et les déversent dans le cylindre ; le ciment est versé au-dessus dans une trémie et il est entraîné par une vis qui le déverse régulièrement dans le mélangeur. L'eau n'est introduite dans le cylindre que vers la moitié de sa longueur ; dans la première partie les pierres, le sable et le ciment se trouvent ainsi mélangés d'abord à sec (*fig.* 92). Le rendement de cette bétonnière est très élevé.

On emploie depuis quelques années en Allemagne une bé-

tonnière qui présente des dispositions toutes différentes ; elle se compose d'un tambour en tôle épaisse tournant autour de son



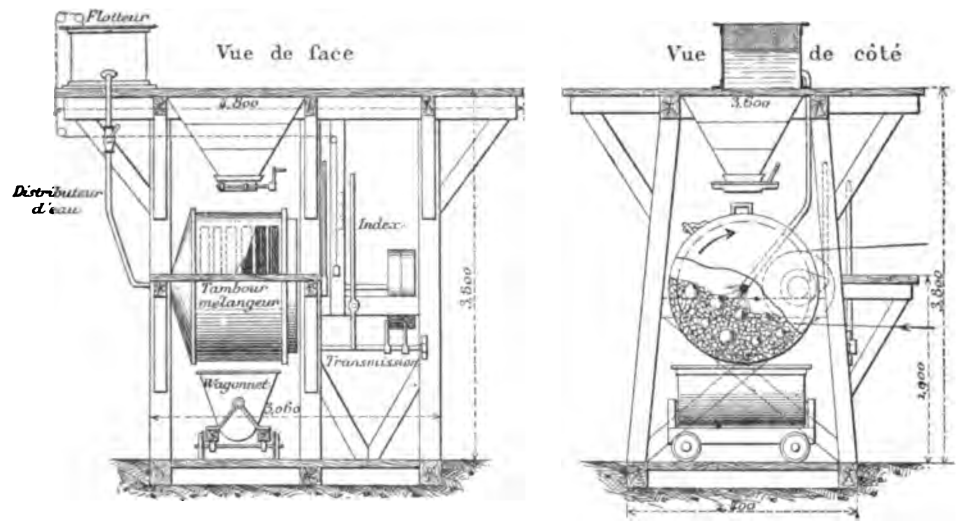
92. — Bétonnière Carrey.

axe ; ce tambour renferme des boulets très lourds qui effectuent le mélange. La trémie d'alimentation est remplie des quantités voulues de ciment, sable et gravier à l'aide de chaînes à godets ; les matières tombent dans le tambour à travers une grille à

barreaux largement espacés. Cette grille est fermée par un couvercle, puis on met le tambour en mouvement. Le mélange se fait à sec pendant deux minutes; ensuite un tube perforé à la partie inférieure et pénétrant dans le tambour par un axe fournit à ce dernier l'eau qui lui est nécessaire. Le mélange avec l'eau dure trois minutes de sorte que l'opération dure en tout 5 minutes. Pour vider l'appareil, on ouvre le couvercle de la grille et on fait tourner le tambour; le béton passe à travers les barreaux qui retiennent seulement les boulets.

Il faut 2 à 3 minutes pour l'introduction des matières, 4 à 5 pour le mélange, et 1 à 2 pour la vidange. Le plus grand modèle produit 4 à 5 mètres cubes de béton à l'heure (*fig.* 93).

La bétonnière système Delacquis se compose d'une auge

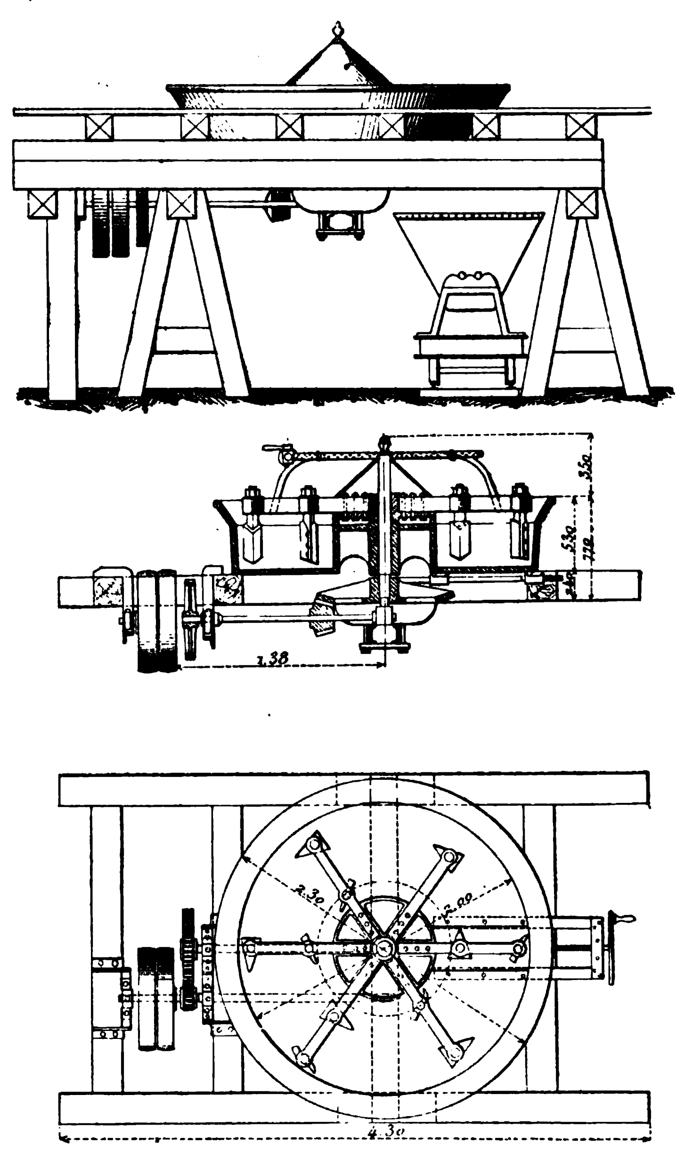


93. — Bétonnière allemande

circulaire dans laquelle le mélange des matières s'opère à l'aide de fortes pièces d'acier en forme de soc de charrue, ces pièces sont fixées à des distances variables du centre sur une roue tournant à 10-15 tours par minute. Le béton est introduit à la pelle dans l'auge et on le vide par une trappe dans un wagonnet qui se trouve au-dessous (*fig.* 94).

Quand le béton se fait à bras, le meilleur procédé consiste à

préparer le mortier à part et à le mélanger ensuite avec les pierres ; celles-ci doivent toujours être bien lavées avant l'em-



94. — Bétonnière Delacquis.

ploi. Il est préférable de gâcher le mortier un peu clair ; le béton est alors plus compact, et on est mieux assuré de ne pas laisser de vide.

Dans le cas où l'on fait le mortier à part et si on en prend un volume déterminé pour le mélanger avec des pierres, il faut tenir compte de ce que le mortier, une fois mis en place, surtout quand le béton est damé, occupe un volume un peu moindre. Un mortier à 400 kilogrammes, par mètre cube de sable moyen, par exemple, donne un volume de $1^{m^3},050$ à $1^{m^3},100$ si on se contente de le verser dans une mesure; mais avec un léger tassement, on arrive à lui faire occuper un volume de $0^{m^3}95$ à $0^{m^3},980$ seulement. On doit donc forcer un peu le volume du mortier pour compenser le tassement.

Mise en place du béton. — Il faut éviter autant que possible de jeter le béton à la pelle, car les cailloux se trouvent alors séparés du mortier ; on doit le transporter jusqu'à l'endroit où il est mis en place ; s'il est nécessaire de le laisser tomber d'une certaine hauteur il est bon de le faire passer par une bétonnière verticale qui le mélange de nouveau.

Le béton est généralement damé, mais il n'est pas nécessaire de le tasser fortement ; l'eau doit refluer légèrement à la surface après quelques coups de dame.

Quand on exécute du béton maigre il faut, au contraire, gâcher un peu sec et comprimer aussi fortement que possible. Si on employait trop d'eau, le mortier se trouverait délavé et une partie de l'agglomérant serait entraînée avec l'eau s'échappant du mortier ou viendrait se réunir dans certains points du béton qui n'aurait plus ainsi d'homogénéité.

Pour couler le béton sous l'eau on peut recommander le système employé par M. Heude, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, et qui a été décrit par cet ingénieur au Congrès des Procédés de construction. Nous reproduisons la partie du compte rendu des séances qui a trait à ce procédé :

Un tube carré de $0^m,40$ de côté en simples planches est descendu verticalement jusqu'au fond de la fouille, de manière que son extrémité supérieure dépasse la surface de l'eau d'environ $1^m,50$. Ce tube peut être soulevé à l'aide d'un treuil mobile dans le sens de la largeur de la fouille sur un échafaudage installé au-dessus de l'enceinte ; une corde ou

chaîne attachée à la partie inférieure du tube permet à un ouvrier de le déplacer en tirant dessus obliquement.

On remplit alors le tube de béton jusqu'en haut, la partie inférieure reposant sur le fond. On soulève ensuite légèrement le tube à l'aide du treuil, le béton s'écoule partiellement sur le fond ; on change le tube de place au moyen de la chaîne oblique, et en même temps on le laisse reposer de nouveau sur le fond ; on remplit la partie supérieure du tube de béton, on le soulève en le déplaçant et ainsi de suite.

Il s'établit ainsi de la partie supérieure à la partie inférieure un véritable courant de béton qui traverse toute la couche d'eau et qui arrive au fond de la fouille sans avoir été mis en contact avec cette eau. Une seule précaution est à prendre, mais elle est essentielle ; il faut veiller à ce que, lorsqu'on soulève le tube, la partie supérieure du béton ne descende pas à un niveau inférieur à celui de l'eau.

Lorsqu'on a déplacé l'extrémité inférieure du tube au moyen de la chaîne oblique, le tube revient dans la verticale ; l'opération est donc très simple et très rapide.

Béton Coignet. — Le principe du béton Coignet est de mélanger soigneusement avec le sable de la chaux hydraulique, en quantité strictement nécessaire, et de comprimer fortement le mortier gâché avec très peu d'eau. On arrive ainsi à donner à celui-ci une compacité beaucoup plus grande que s'il était traité à la manière ordinaire et la résistance est plus élevée ; c'est ce qui explique qu'avec des quantités de chaux assez faibles on puisse arriver à produire des mortiers suffisamment résistants.

Généralement, on ajoute au mélange une certaine quantité de ciment pour obtenir une prise plus rapide et une plus grande dureté.

Pour arriver à de bons résultats avec ce mode de construction, il est indispensable : 1° de mélanger très intimement le sable et l'agglomérant avant d'ajouter l'eau ; 2° de n'employer que la quantité d'eau exactement nécessaire et de malaxer de nouveau le mélange avec beaucoup de soin, de manière à obtenir une homogénéité parfaite ; 3° de faire subir au mortier, quand on le met en place, une compression très énergique.

Les dosages employés le plus fréquemment sont les suivants :

Sable	1 mètre cube
Chaux	de 125 à 150 kilogrammes
Ciment	de 50 à 60 kilogrammes

Si l'on voulait obtenir une résistance assez élevée en peu de temps il faudrait évidemment forcer la dose de ciment.

M. F. Coignet a commencé en 1855 à préconiser ce mode de construction ; il a obtenu des résultats remarquables dans des travaux très importants parmi lesquels le plus connu est l'aqueduc d'amenée d'eau de la Vanne.

12. Dallages. — L'exécution des dallages en ciment demande certaines précautions qui sont trop souvent négligées, ce qui explique les insuccès que l'on constate quelquefois.

Le ciment doit être de toute première qualité ; les usines livrent d'ailleurs généralement un ciment spécial pour dallage. Il ne suffit pas, en effet, d'obtenir une résistance élevée à la traction ou à la compression, il faut aussi que la résistance à l'usure soit très grande ; ce résultat ne peut être obtenu qu'avec un ciment très cuit, ayant une forte densité.

La qualité du sable a une importance presque aussi grande que celle du ciment ; nous ne saurions trop répéter que le sable doit être absolument régulier comme grosseur, qu'il ne doit être ni trop gros, ni trop fin, et surtout qu'il ne doit jamais contenir de grains assez volumineux (1). Il est indispensable de passer le sable au moins à un tamis, assez gros, de manière à éliminer les gros grains ; on se servira, par exemple, d'un tamis de 20 mailles par centimètre carré (n° 12). Si le sable contient de la vase, de l'argile ou d'autres impuretés, il faut le laver ou le passer à un tamis fin de 120 mailles par centimètre carré (n° 30).

Quand il s'agit d'établir le dallage sur un sol ordinaire, on commencera par exécuter une couche de béton de 0,15

(1) Les sables siliceux donnent des résultats bien supérieurs aux sables calcaires pour la confection des dallages.

d'épaisseur; si le sol est mauvais ou si le dallage doit être soumis à un passage de voitures, il faut donner au béton une épaisseur de 0,20, au moins.

Le béton peut se faire de la façon suivante : On mélange un mortier composé de 1 partie de ciment pour 4 à 5 parties de sable, avec du gros gravier ou des cailloux à raison de 1 de mortier pour 2 de pierres. Ce béton est bien damé et aussitôt, avant qu'il ne soit pris, on doit étendre la couche de mortier riche; on obtient ainsi une liaison parfaite entre les deux mortiers. Si, au contraire, on attend que le béton ait fait prise, l'adhérence est très imparfaite et la résistance du dallage est beaucoup moindre.

Pour le mortier de la chape, on peut prendre, en général, une partie de ciment pour une partie de sable en poids ou en volume. Quand on emploie un sable de très bonne qualité, le dosage de 2 parties de ciment pour 3 de sable, ou même de 1 de ciment pour 2 de sable, donne des résultats très satisfaisants.

Le mortier doit être bien mélangé à sec, par petites portions, puis gâché avec très peu d'eau, de manière à lui donner l'aspect de terre humide; en le prenant dans la main, on doit pouvoir le pétrir et en former une boule bien agglomérée, sans que le mortier s'attache aux doigts. Le mortier étendu sur le béton est comprimé à l'aide de la truelle ou d'une dame légère; quand il a pris l'aspect d'une pâte ferme et que l'eau commence à paraître à la surface, on arrête le damage.

Le mortier gâché en pâte claire donne des résultats beaucoup moins bons; comme on ne peut pas le damer, il reste rempli de bulles d'air après la mise en place; l'eau en excès, en s'évaporant, laisse aussi des vides; le mortier est poreux et il s'use très vite. Le lissage procure bien une surface unie et paraissant satisfaisante, mais dès que la couche très mince de la surface est usée, le mortier apparaît plein de vides et l'usure se continue rapidement. Avec un mortier bien serré et bien plein, au contraire, la résistance est égale dans tous les points et le dallage se conserve parfaitement, même quand la couche superficielle finit par être usée.

Nous n'entrerons pas dans les détails concernant le dressage, le

lissage, la confection des dessins, etc., que les ouvriers spéciaux connaissent très bien. Nous tenons seulement à attirer l'attention sur les points suivants dont il n'est pas assez tenu compte, même par les spécialistes : Nécessité d'employer un sable bien régulier, — de confectionner une couche de béton suffisamment épaisse, — de poser le dallage sur le béton avant la prise de celui-ci, — enfin de gâcher le mortier avec peu d'eau et de le comprimer pour le mettre en place.

Quand le mortier est bien dur, en général 24 heures après l'exécution du dallage, on doit l'arroser largement puis le recouvrir de sable humide que l'on arrose également aussi souvent que possible. La résistance est beaucoup plus grande quand on maintient le mortier très humide pendant les premiers jours, que s'il reste exposé à l'air et qu'il se dessèche rapidement. Au bout de quinze jours on peut enlever le sable et livrer le dallage à la circulation.

L'emploi d'eau de mer pour gâcher le mortier donne d'excellents résultats, quand il s'agit de la confection des dallages ; la prise, est en effet, plus lente et on peut travailler plus facilement le mortier, de plus les sels de l'eau de mer maintiennent le mortier humide et lui permettent ainsi de durcir dans de meilleures conditions.

13. Enduits verticaux. — Quand on doit exécuter un enduit sur un mur neuf ou ancien, la première précaution à prendre est d'obtenir une surface bien propre et de dégrader profondément les joints des pierres. Avant d'appliquer le mortier, on arrose largement la surface à enduire. Un mortier trop riche en ciment donne généralement de mauvais résultats, il est préférable de prendre un dosage de 1 de ciment pour 2 ou 3 de sable ; celui-ci ne doit pas être trop gros ni contenir une trop grande proportion de parties très fines. Il faut éviter le lissage à la truelle par la raison que nous avons indiquée précédemment, le mieux est de comprimer fortement et de polir le mortier à l'aide d'une taloche en bois.

Il est avantageux de se servir, pour exécuter les enduits verti-

caux, de ciment ne prenant pas trop lentement. On doit éviter soigneusement d'employer du mortier regâché.

Pour les enduits de réservoirs, qui doivent être absolument imperméables, on peut adopter un dosage plus riche, une partie de ciment pour une partie de sable, par exemple. Le mortier doit être gâché ferme ; le lissage à la truelle a moins d'inconvénient que pour les enduits ordinaires puisqu'il n'y a pas à craindre que le mortier soit soumis à une dessiccation rapide. Quand l'enduit est terminé et qu'il est bien pris, il est bon de maintenir le réservoir plein d'eau pendant huit à quinze jours ; le mortier est alors beaucoup plus dur et plus imperméable. En outre la chaux que le mortier frais abandonne toujours se trouve dissoute dans l'eau ou carbonatée et on peut remplir ensuite le réservoir de n'importe quel liquide.

14. Mélanges de ciment et de chaux. — L'emploi, pour la confection des mortiers, de mélanges de chaux et de ciment est assez fréquemment usité en France ; on additionne généralement une petite quantité de ciment Portland à la chaux hydraulique pour obtenir une prise plus rapide et une dureté plus grande. (Béton Coignet).

En Allemagne, l'utilisation des mélanges de chaux et de ciment a pris un grand développement, mais on procède d'une façon toute différente. L'addition de chaux au ciment se fait en proportion assez faible et celle-ci ne sert qu'à donner au mortier la plasticité suffisante pour qu'on puisse l'employer facilement. Un mortier composé d'une partie de ciment pour 6 à 7 de sable, ou de 200-250 kilogrammes de ciment pour 1 mètre cube de sable, est souvent maigre, peu liant, et se travaille difficilement ; dans un grand nombre de cas la résistance d'un pareil mortier serait cependant bien suffisante ; en lui ajoutant une petite quantité de chaux en poudre ou en pâte on lui donne la qualité qui lui manquait et il devient d'un emploi facile.

Comme la chaux ne joue que le rôle d'une matière inerte, il est indifférent qu'elle soit hydraulique ou non ; la chaux grasse à l'avantage de coûter moins cher.

Première Série

Composition du mortier (pour 1 mètre cube de sable normal pesant 1 300 kilogrammes)		Quantité d'eau de gâchage	Volume du mortier	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré à la traction 7 jours	à la traction 28 jours	à la traction 3 mois	à la traction 1 an	à la traction 2 ans	à la traction 3 ans	à la traction 4 ans	à la compression 7 jours	à la compression 28 jours	à la compression 3 mois	à la compression 1 an	à la compression 2 ans	à la compression 3 ans	à la compression 4 ans	Observations
					kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	
Pour 1 mètre cube de sable : 550 kilogrammes du mélange de ciment et de chaux	Ciment . 80 / Chaux . 20	11,0	»	»	15,7	21,2	29,9	37,8	36,0	42,5	41,5	87,0	145,0	205,0	273,3	296,7	300,0	360,0	
	Ciment . 65 / Chaux . 35	12,5	»	»	14,6	20,2	25,6	36,1	32,0	34,7	36.9	90,0	130,0	198,0	275,0	246,7	273,3	310,0	
	Ciment . 45 / Chaux . 55	13,0	»	»	10,2	14,4	22,7	33,0	29,9	34,7	»	78,7	106,7	168,3	246,7	250,0	243,3	270,0	
	Ciment . 30 / Chaux . 70	13	»	»	8,5	13,0	19,7	25,9	26,4	29,6	31.1	48,0	68,7	99,7	188,7	185,0	160,0	190,0	
Mélange de 70 de ciment et 30 de chaux pour 1 mètre cube de sable	250kg.	10	0,810	1,90	5,5	9,4	11,1	15,0	15,4	»	»	52,0	65,0	81,7	93,3	101,7	105,0		
	450	10	0,845	2,16	14,1	18,9	22,7	33,6	33,9	»	»	145,0	185,0	211,7	256,7	261,7	288,3		
	450	10	0,935	2,20	23,5	25,1	34,3	41,1	44,7	»	»	185,0	250,0	303,3	316,7	390,0	396,7		
	450 (1)	10	0,845	2,16	16,5	26,0	31,0	37,5	53,9	»	»	155,0	181,7	228,3	263,3	313,3	553,3		(1) mortiers conservés à l'air.

Deuxième Série

Composition du mortier			Densité du mélange	Résidu sur le tamis 900m	Résidu sur le tamis 5000m	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré à la traction 7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans
								kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Ciment .	90	pur	1085	5	34	27	»	28,5	34,7	38,0	»	39,3	»	40,7	40,5	40,7
Chaux .	10	mortier 1 : 3				12	»	16,1	21,8	26,5	27,9	29,2	31,7	32,7	33,0	32,2
Ciment .	80	pur	915	5	32	32,5	»	20,4	20,7	33,7	36,4	38,2	37,9	43,7	44,0	39,7
Chaux .	20	mortier 1 : 3				12	»	14,1	19,9	23,1	25,4	29,5	30,6	33,1	34,0	30,9
Ciment .	70	pur	815	3	30	38	»	11,5	18,8	23,0	»	30,5	30,9	26,5	34,9	31,1
Chaux .	30	1 : 3				12	»	9,8	13,6	17,6	20,9	22,4	26,1	26,4	26,7	25,9
Ciment .	60	pur	760	4	27	40	»	11,4	13,0	14,2	20,0	25,1	23,5	27,2	26,4	28,9
Chaux .	40	1 : 3				14	»	8,6	12,3	15,9	19,4	21,5	22,5	23,4	23,9	24,7
Ciment .	100	1 : 3	1265	8	36	11	2,11	10,0	16,1	20,5	25,0	26,5	30,7	33,1		
Chaux .	0	1 : 3				11	2,11	9,3	16,1	20,8	31,4	40,6	50,0	56,7	à l'air	
		1 : 5				10	1,82	4,7	6,4	10,4	»	12,7	14,2	17,6		
Ciment .	70	1 : 3	1025	6	28	10,5	2,11	11,4	15,3	20,7	28,2	27,4	31,9	33,6		
Chaux .	30	1 : 3				10,5	2,11	14,2	17,9	25,4	24,7	34,0	»	»	à l'air	
		1 : 5				10	1,99	5,6	7,5	9,0	11,7	12,5	15,1	18,5		
Ciment .	60	1 : 3	925	5	22	10	2,16	10,4	13,5	16,7	19,5	21,7	29,9	30,7		
Chaux .	40	1 : 3				10	2,16	11,9	19,5	27,1	24,2	32,2	51,1	58,1	à l'air	
		1 : 5				10	1,91	»	6,3	8,1	9,4	10,9	14,0	14,5		
Ciment .	50	1 : 3	675	4	22	12	2,01	6,0	8,1	11,4	11,2	13,6	18,9	18,3	à l'air	
Chaux .	50	1 : 3				12	2,01	7,6	14,1	18,8	15,6	26,6	46,4	46,2		

Les proportions qui donnent les meilleurs résultats sont : 1 de ciment pour 1 ou 1/2 de chaux en poudre, en volume. Les dosages employés couramment en Allemagne sont les suivants (1) : 1 volume ciment, 1/2 volume chaux, 6 volumes sable ; (2) 1 volume ciment, 1 volume chaux, 10 volumes sable. Le mortier (2) est utilisé pour les grosses maçonneries et remplace le mortier de chaux hydraulique. On trouvera dans les tableaux p. 293-294 les résultats d'expériences faites en mélangeant avec du ciment des quantités plus ou moins grandes de chaux. On a employé dans ces essais de la chaux grasse éteinte et blutée ; les mélanges ont été faits en poids. Le dosage de 25 à 30 de chaux pour 70 à 75 de ciment, en poids, correspond à peu près au dosage de 1 de chaux pour 1 de ciment en volume.

Ces quelques expériences font voir que l'addition de chaux grasse au ciment Portland donne de très bons résultats et que les mortiers à l'air, notamment, acquièrent une résistance très élevée. L'emploi de ces mélanges ne présente aucune difficulté et il peut faire réaliser une grande économie ; la chaux grasse se trouve, en effet, presque partout à bas prix ; dans bien des cas, le prix de revient du mètre cube de mortier est inférieur à celui du mortier de chaux hydraulique, et il présente sur celui-ci l'avantage de procurer une prise plus rapide et une plus grande résistance.

Il faut, bien entendu, que la chaux soit bien éteinte, c'est la seule précaution qu'il y ait à prendre. On peut mélanger préalablement la chaux et le ciment, ou bien ajouter au mélange de ciment et de sable la quantité de chaux en poudre qui a été prévue.

15. — Mélange de ciment avec diverses matières. — La question de savoir si le ciment Portland peut être amélioré par l'addition de matières étrangères convenablement choisies est une de celle qui a donné lieu aux plus nombreuses controverses. Les matières d'addition sont de deux sortes : les premières sont de nature pouzzolanique, trass, pouzzolane, laitier granulé, etc., les secondes sont des matières inertes, de préférence siliceuses, telles que sable, laitier vitrifié.

L'addition de matières pouzzolaniques a été préconisé récemment par M. le docteur Michaëlis ; d'après lui, le ciment Portland contenant une certaine quantité de chaux qui est déplacée de sa combinaison avec la silice et reste dans le mortier à l'état d'hydrate, il convient de lui ajouter une matière susceptible de se combiner avec cette chaux et de concourir ainsi à la résistance du mortier. De nombreuses expériences semblent justifier cette manière de voir et théoriquement elle paraît très vraisemblable. Mais il est très difficile de savoir si l'augmentation de résistance procurée par une addition de matière étrangère est due à une action chimique ou simplement physique. On obtient, en effet, une augmentation de résistance plus grande avec une addition de poudre calcaire très fine qu'avec du trass ou du laitier ; il y a là évidemment une action physique due uniquement à ce que l'addition de poudre a donné au mortier une plus grande compacité.

Il en est de même pour les mélanges de matières inertes ; ces additions se sont faites depuis très longtemps, presque toujours d'ailleurs dans un but de fraude. Depuis quelques années on a voulu lancer un produit constitué par un mélange de sable et de ciment moulus ensemble et amenés à une extrême finesse ; il n'y a de nouveau dans ce procédé que la plus grande finesse de mouture du produit et il se pratiquait en fait depuis fort longtemps. Les avantages qu'il doit procurer sont d'ailleurs contestables et il paraîtra toujours bien difficile de faire admettre aux acheteurs qu'ils doivent payer relativement cher du sable qu'ils pouraient tout aussi bien ajouter au ciment sur le chantier. D'autre part, ces mélanges étant faits sans règle précise et à la volonté du fabricant, le produit livré ne présenterait aucune garantie et on ne pourrait jamais être sûr de sa régularité. L'application de ces procédés, peut-être utiles dans certains cas et dignes assurément d'être étudiés, ne nous paraît devoir être tentée actuellement que sur de grands chantiers de travaux publics où l'on peut disposer d'un outillage important permettant de faire le mélange sur place et surtout de le contrôler. Les fabriques de ciment doivent se borner à livrer des produits purs si elles veulent conserver la confiance des acheteurs.

16. Travaux en ciment avec ossature métallique — Ce système de construction consiste à emprisonner des barres de fer ou d'acier dans du mortier de ciment auquel on donne la forme extérieure de l'ouvrage à construire. François Coignet est le premier qui ait pressenti tout le parti que l'on pouvait tirer de cette combinaison du fer et du ciment. Après lui Monier en fit d'assez nombreuses applications, mais ce n'est que depuis une dizaine d'années que l'emploi du ciment armé a pris une place importante dans les constructions. On exécute maintenant avec ce procédé des dalles, planchers, réservoirs, conduites d'eau sous pression, ponts à grandes portées, silos, etc.

Toutes les constructions en ciment et fer peuvent se classer dans les 3 catégories suivantes :

1° Corps travaillant à l'extension (tuyaux à pression intérieure, réservoirs, gazomètres, etc.) ;

2° Corps travaillant à la compression (tuyaux à pression extérieure, égouts, galeries, etc.) ;

3° Corps travaillant à la flexion (planchers, toitures, dalles, ponts, etc.).

La combinaison rationnelle du fer et du ciment repose sur les faits suivants qui ont été démontrés par de nombreuses expériences dans ces dernières années :

1° Egalité du coefficient de dilatation du fer et du ciment.

2° Adhérence très grande entre le fer et le ciment.

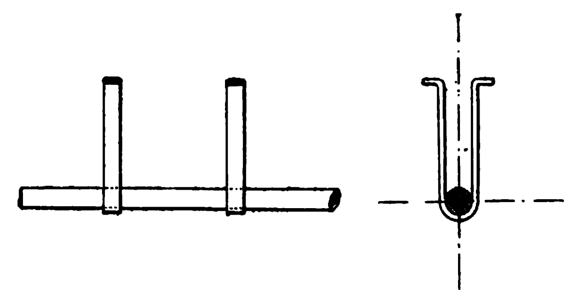
3° Impossibilité d'oxydation du fer noyé dans le mortier de ciment.

Les dispositions adoptées par les divers constructeurs de ciment armé diffèrent surtout par les détails ; tandis qu'en France, en Allemagne, en Autriche, le principe généralement suivi consiste à noyer dans le mortier de ciment une série de barres de fer parallèles croisées par une deuxième série de barres transversales de manière à former un véritable réseau métallique, les Anglais et les Américains suppriment généralement les barres transversales qu'ils jugent inutiles ; par contre, ils donnent aux barres parallèles des dimensions plus importantes, ils les assemblent même par des rivets et des boulons en consti-

tuant ainsi un véritable ouvrage de serrurerie noyé dans le ciment.

M. Hennebique supprime également les barres transversales mais il emploie dans le sens vertical des étriers dont le but est de transmettre l'effort supporté par la partie tendue à la partie comprimée de la construction (*fig*. 95).

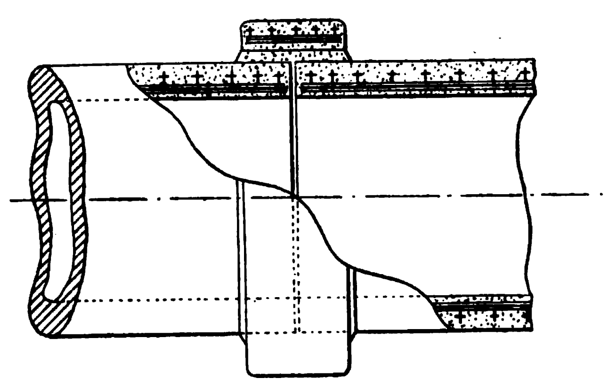
Dans le système Bonna le réseau métallique est constitué



95. — Disposition des étriers dans les poutres Hennebique.

par des aciers profilés en † ; ces aciers sont très résistants et donnent une ossature rigide se tenant d'elle-même et conservant bien sa forme avant qu'elle soit enveloppée de ciment. Ce système est employé principalement pour la construction des tuyaux (*fig*. 96).

MM. Coignet et Monnier emploient des fers ronds de diffé-

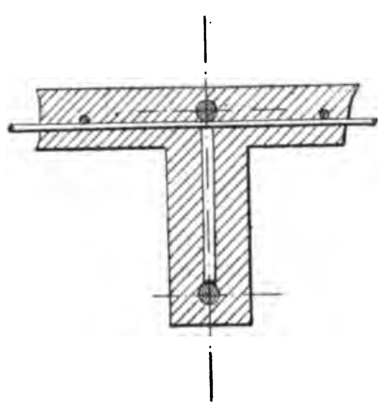


96. — Tuyaux avec ossature métallique système Bonna.

rents diamètres croisés perpendiculairement par d'autres fers ronds, la jonction de ces fers est faite avec des fils de fer par

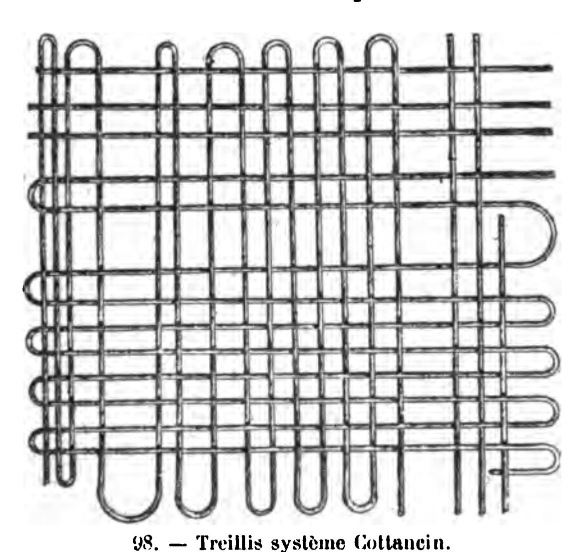
l'attache dite de treillageur. La poutre Coignet est représentée par la *fig.* 97.

Le système Cottancin diffère des précédents en ce que le réseau métallique ne comporte aucune attache aux points de croisement des barres longitudinales et transversales; celles-ci sont constituées par des fers ronds de 4 millimètres de diamètre dont les uns forment la chaîne et les autres la trame d'un véritable tissu métallique continu; les mailles de ce tissu sont plus ou moins larges suivant la charge que la construction doit supporter (*fig.* 98).



97. — Poutre Coignet.

De très nombreuses expériences ont été faites sur la résistance des constructions en ciment armé; nous donnons plus loin un tableau d'essais exécutés sur des plaques, système Cottancin, au laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées. La Société des ingénieurs et architectes autrichiens a institué des expériences qui ont eu un grand retentissement, sur des voûtes en briques, béton, maçonnerie et ciment armé (1). Partout les essais ont montré



98. — Treillis système Cottancin.

(1) Rapport de la Commission des voûtes, *Revue technique*, F. Juven, éditeur, 20, rue Saint-Joseph, Paris.

Numéros des essais	Désignation des échantillons d'après l'état de M. Cottancin	Dimensions des plaques			Constitution de l'ossature				Dates	
		Longueur	Largeur	Epaisseur	Diamètre des fils	Nombre de brins dans la longueur	Nombre de brins dans la largeur	Poids de l'ossature	de fabrication	de l'expérience
									Première Série. — Distance	
1	Plaque n° 1.	1,10	0m,420	0m,040	4mm,4	10	86	9k,350	13 avril 1890	13 mai 1890
2		1,10	0, 400	0, 038	4, 4	10	86	9, 350	»	»
3	Plaque n° 2.	1,10	0, 400	0, 043	4, 4	10	26	3, 500	»	»
4		1,10	0, 400	0, 040	4, 4	10	26	3, 500	»	28 mai 1890
5	Plaque n° 3.	1,10	0, 400	0, 040	4, 4	10	10	2, 000	»	13 mai 1890
6		1,10	0, 400	0, 040	4, 4	10	10	2, 000	»	28 mai 1890
7	Plaque T.	1,10	0, 445	0, 040	4, 4	13	11	2, 250	23 avril 1890	23 mai 1890
8		1,10	0, 445	0, 040	4, 4	13	11	2, 250	»	»
9	Plaque n° 1.	1,10	0, 445	0, 024	4, 4	12	28	4, 150	»	»
10		1,10	0, 440	0, 022	4, 4	12	28	4, 150	»	»
11	Plaque n° 2.	1,10	0, 420	0, 023	4, 4	13	8	1, 750	»	13 mai 1890
12		1,10	0, 440	0, 024	4, 4	13	8	1, 750	»	23 mai 1890
13	Plaques armées par des épines.	1,10	0, 450	0, 042	4, 4	13	42	6, 150	15 avril 1890	15 mai 1890
14		1,10	0, 450	0, 042	4, 4	13	56	8, 300	»	»
15		1,10	0, 430	0, 045	4, 4	13	68	10, 250	»	»
									Deuxième Série. — Distance	
16	Plaque n° 1.	2,10	0, 435	0, 043	4, 4	22	85	21, 250	19 avril 1890	19 mai 1890
17	Plaque n° 2.	2,10	0, 425	0, 040	4, 4	23	26	7, 750	»	»
18	Plaque n° 3.	2,10	0, 400	0, 040	4, 4	24	11	5, 000	»	»
19	Plaque armée par des épines.	2,10	0, 460	0, 040	4, 4	22	68	20, 000	23 avril 1890	23 mai 1890

Limite d'élasticité		Charge de rupture	Observations
Charge	Flèche		
d'appui 1 mètre			
220k	0mm,7	540k	Cette plaque a été essayée sens dessus dessous.
1 300	9, 8	1 780	
1 220	7, 1	1 620	
820	5, 2	1 420	Cette plaque avait à 6 reprises différentes, été portée à l'étuve à des températures de 90 à 130°, puis refroidie brusquement en la plongeant dans l'eau. Elle n'a manifesté, dans cette épreuve, aucune fissure ni changement de forme.
220	1, 3	480	
180	0, 6	580	
180	1, 9	520	
180	3, 3	580	
360	19, 0	560	
240	17, 0	380	Plaque traitée comme la plaque n° 4.
120	10, 9	170	
120	14, 3	220	Croquis des plaques armées : N° 13 (0,15) ; N° 14 (0,24) ; N° 15 (0,35)
2 600	1, 0	non rompue	
3 200	0, 8	non rompue	
La plaque n° 15 ne pouvait être utilement expérimentée en raison des résultats obtenus sur les deux précédentes.			
d'appui 2 mètres			
740	30, 5	980	
320	26, 6	460	
120	6, 3	240	
3 400	2, 6	non rompue	Croquis de la plaque n° 19 (0,31)

les qualités remarquables des travaux en fer et ciment ; non seulement on obtient une très grande sécurité par suite de l'élasticité de la construction, mais toutes les causes d'altération ou de destruction n'ont aucune prise sur le ciment armé qui, contrairement à ce qui se passe dans tous les autres systèmes, devient avec le temps de plus en plus résistant. Le principal avantage du ciment armé dans les bâtiments est de ne pas être altéré par le feu ; des expériences faites de divers côtés et dont la plus célèbre est celle de Bauschinger ont montré qu'un incendie, même très violent, ne pouvait compromettre la solidité d'une construction en fer et ciment.

Il serait trop long d'énumérer les principaux ouvrages construits dans ces dernières années en ciment armé ; nous nous bornerons à citer des ponts ayant jusqu'à 40 mètres de portée exécutés surtout en Amérique ; la galerie d'Achères, de 2 000 mètres de longueur et 5 mètres de diamètre, construite par M. Coignet ; les conduites des eaux d'égouts à Achères construites par M. Bonna ; le développement de cette canalisation dépasse 40 kilomètres, la pression atteint 40 mètres avec des diamètres allant jusqu'à $1^{m},80$; le même constructeur vint d'exécuter à Nîmes une conduite d'eau de $0^{m},90$ de diamètre avec une pression de 100 mètres.

M. Chassin a construit pour la Compagnie générale des Eaux un réservoir de 4 000 mètres ayant 32 mètres de diamètre ; le nombre de réservoirs construits en ciment armé est d'ailleurs considérable.

Tous les planchers du lycée Victor Hugo, rue de Sévigné, à Paris, ont été établis en ciment armé, système Cottancin. Le système Hennebique a été appliqué pour la construction de filatures, de moulins, de bâtiments considérables.

CHAPITRE VI

CAUSES DE DESTRUCTION DES MORTIERS

La destruction d'un mortier peut provenir soit de la mauvaise qualité de l'agglomérant, soit de l'action de causes extérieures ; dans le premier cas, la désagrégation se produit dans la masse même du mortier qui se trouve, dans un temps généralement assez court, altéré profondément dans toutes ses parties. Dans le second cas, l'altération se manifeste dans certains points du mortier ou seulement à la surfaee et la destruction n'avance que lentement; elle peut être limitée et s'arrêter au bout d'un certain temps.

1. Chaux libre. — La désagrégation d'une gangue hydraulique par le fait de l'agglomérant est due presque toujours à ce que celui-ci contient en excès de la chaux libre non hydratée. L'extinction tardive de cette chaux détermine un gonflement qui peut être assez considérable pour détruire la cohésion du mortier.

« La proportion de chaux libre nécessaire pour altérer d'une façon notable les qualités d'un ciment, dit M. Le Chatelier, est extrêmement faible. J'ai montré plus haut que l'addition de 1 % de chaux de l'azotate à un ciment de bonne qualité suffit pour réduire de moitié sa résistance. Cette cause de destruction me paraît mériter une attention beaucoup plus grande qu'on ne lui en accorde habituellement. Je serais porté à croire qu'au moins neuf fois sur dix c'est la seule cause de dégradation des mortiers hydrauliques employés à l'air ou à l'eau douce. Si elle

échappe souvent à l'observation c'est que son action ne commence parfois à se faire sentir qu'au bout de plusieurs mois, c'est-à-dire longtemps après la fin des essais tels qu'on les pratique habituellement aujourd'hui. »

On attribue aussi quelquefois la décomposition des mortiers à la présence dans le ciment ou la chaux d'aluminate de chaux extrabasique (Expansifs de M. Bonnami). Il est peu probable cependant que ce sel puisse produire le gonflement d'un mortier; il est, en effet, extrêmement altérable par l'eau et comme il existe en quantité relativement faible dans les produits hydrauliques ordinaires, son hydratation doit toujours se produire avant la prise.

La chaux libre susceptible de produire le gonflement des mortiers peut exister dans les ciments Portland de mauvaise qualité par suite d'un dosage irrégulier ; elle se trouve en quantité plus ou moins grande dans les chaux hydrauliques imparfaitement éteintes. Les ciments prompts en renferment généralement une certaine proportion, mais ces ciments sont cuits à une température peu élevée, ils restent toujours exposés à l'air pendant quelques jours avant d'être employés, la chaux libre se trouve hydratée rapidement et n'a plus d'influence facheuse. Les ciments naturels à prise lente ou demi-lente et les ciments de grappiers renferment toujours des quantités, souvent assez élevées, de chaux libre au moment où ils viennent d'être fabriqués ; aussi leur emploi n'est-il possible qu'après un séjour plus ou moins long en silos. Dans ces ciments, cuits à une température plus élevée que les ciments prompts, la chaux libre s'éteint beaucoup plus lentement et il faut un séjour prolongé à l'air humide pour assurer son extinction complète.

2. Ciments magnésiens. — La magnésie produit le même effet que la chaux libre ; dans ces dernières années, des accidents considérables survenus dans des ouvrages où l'on avait employé des ciments magnésiens ont attiré l'attention sur cette question.

Les ciments magnésiens donnent de très bons résultats aux essais et les maçonneries faites avec ces ciments présentent toute

la solidité désirable pendant plusieurs mois et même plusieurs années. Mais à un moment donné, le gonflement commence à se produire et avec une telle intensité que rien ne peut y résister (Voir sur ce sujet la note de MM. Durand-Claye et Debray. *Annales des Ponts et Chaussées*, juin 1886).

Les expériences faites à l'Ecole des Ponts et Chaussées ont établi nettement le rôle de la magnésie au point de vue du gonflement des mortiers. Des baguettes de 1 mètre de longueur faites en ciment magnésien se sont allongées de 26 millimètres pour 1 mètre en 3 ans. En mélangeant avec du ciment de Boulogne 25 °/₀ de magnésie calcinée, on a constaté un allongement de 31 millimètres 86 pour 1 mètre pendant la même période. M. Dyckerhofl a exécuté aussi des expériences très intéressantes en vue de déterminer le rôle de la magnésie dans les ciments Portland ; elles ont confirmé pleinement les résultats obtenus à l'Ecole des Ponts et Chaussées.

En Allemagne on a constaté également des accidents dus à l'emploi de ciments magnésiens. Aussi, est-on d'accord aujourd'hui pour proscrire ces produits. En France on ne tolère pas dans les ciments plus de 3 °/₀ de magnésie (1).

3. Sulfate de chaux. — Le sulfate de chaux peut, dans certains cas, déterminer des accidents dans les maçonneries. Quand il s'agit de travaux à l'air ou dans l'eau douce, la présence de faibles proportions de sulfate de chaux dans les ciments ou les chaux n'a pas une grande importance. Mais il n'en est pas de même pour les travaux à la mer ; une quantité de 2 à 3 °/₀ seulement de sulfate de chaux ajoutée au ciment, après cuisson, suffit pour déterminer la décomposition rapide du mortier confectionné avec ce ciment. Le danger n'est plus le même quand le sulfate de chaux existe dans le produit hydraulique avant cuisson, à condition que celle-ci n'ait pas été très intense.

(1) La magnésie n'est nuisible que dans le cas où le ciment a été cuit à une température très élevée ; dans les ciments cuits modérément, comme les ciments romains, la magnésie n'a pas d'inconvénient.

L'altération des mortiers par le sulfate de chaux est due à la combinaison de ce sel avec l'aluminate de chaux ; nous avons pu déterminer les conditions dans lesquelles se produit cette combinaison ainsi que la composition du sel formé.

Le sulfate de chaux existe en faible proportion dans les ciments Portland et les chaux hydrauliques. Dans les ciments prompts, on en trouve quelquefois jusqu'à 7 °/₀ ; cette quantité élevée de sulfate ne paraît pas avoir d'inconvénient, on peut même ajouter à ces ciments 4 à 5 °/₀ de plâtre et le mortier immergé en eau de mer ne présente pas de traces de décomposition. L'aluminate de chaux, qui existe en grande quantité dans ces ciments, s'hydrate en effet très rapidement et la combinaison avec le sulfate de chaux s'opère avant la prise ou dans le même temps. Si, par un artifice quelconque, on empêche l'hydratation rapide de l'aluminate, en mélangeant, par exemple, avec le ciment un peu de chaux éteinte en poudre, il suffit d'ajouter au mélange 1 °/₀ de sulfate de chaux pour que la destruction du mortier se produise rapidement. (Voir annexe I).

Le sulfate de chaux est surtout à craindre quand des eaux chargées de ce sel filtrent à travers les maçonneries. (Voir *Revue du Génie*, novembre-décembre 1887, article de M. le Capitaine Dolot au sujet de l'action du gypse sur les mortiers).

4. Influences extérieures. — Parmi les causes extérieures qui peuvent amener la destruction des mortiers les principales sont : la gelée, les variations de température, la nature de l'eau avec laquelle les mortiers se trouvent en contact.

Les mortiers de ciment Portland résistent bien à la gelée, aux alternatives de sécheresse et d'humidité et aux variations de température. Les mortiers de chaux hydraulique supportent moins bien le froid, principalement pendant les premiers temps du durcissement. Les ciments alumineux sont sujets à s'altérer dans les endroits exposés tantôt à la sécheresse et tantôt à l'humidité ; ils résistent mal également quand ils se trouvent soumis à une température élevée.

Toutes les gangues hydrauliques sont altérables par l'eau pure ; un mortier traversé par de l'eau absolument pure finirait

par perdre toute cohésion, les éléments constitutifs de l'agglomérant étant peu à peu décomposés. (Voir annexe II. Décomposition des ciments et des chaux par l'eau). Mais les eaux naturelles contiennent toujours de l'acide carbonique qui intervient, dans la majorité des cas, pour arrêter la décomposition et boucher les pores du mortier traversé par l'eau.

Quand l'agglomérant n'abandonne pas rapidement une trop grande quantité de chaux, celle-ci est transformée en carbonate qui forme des dépôts adhérents dans les vides du mortier. Si, au contraire, la dissolution de la chaux dans l'eau qui traverse le mortier est abondante, il se produit une grande masse de carbonate de chaux sans cohésion qui est entraînée par l'eau ; le mortier s'appauvrit alors continuellement et il peut arriver à être complètement désagrégé. Ce fait est d'ailleurs assez facile à éviter et il se produit rarement en pratique. On peut dire que les mortiers faits avec des produits hydrauliques de bonne qualité sont inaltérables dans l'eau douce.

Il n'en est pas de même dans l'eau de mer ; celle-ci attaque en effet les gangues hydrauliques beaucoup plus profondément que l'eau douce en raison du sulfate de magnésie qu'elle contient. On sait, depuis Vicat, que c'est à l'action de ce sel qu'il faut attribuer la décomposition rapide des chaux et de certains ciments à l'eau de mer ; le sulfate de magnésie s'empare de la chaux du mortier et se transforme en sulfate de chaux ; la magnésie est précipitée. Si le courant d'eau qui traverse le mortier est assez rapide, le sulfate de chaux formé est entraîné, une nouvelle quantité de chaux entre en dissolution, est aussitôt transformée en sulfate et la gangue se décompose ainsi continuellement et finit par ne plus former qu'une masse sableuse. Quand le courant est plus faible ou s'il ne se produit qu'à intervalles assez éloignés, le sulfate de chaux peut cristalliser et amener ainsi le gonflement du mortier ; c'est à cette cause, tout au moins, que l'on attribue les phénomènes de gonflement des mortiers décomposés par l'eau de mer. L'acide carbonique peut mettre obstacle également à la décomposition lorsque la quantité de chaux dissoute n'est pas trop considérable.

Quand le mortier ne se laisse traverser que difficilement par

l'eau, il arrive rapidement à se colmater et la surface ne se laisse bientôt plus attaquer par le sulfate de magnésie. Les mortiers qui restent constamment immergés résistent généralement beaucoup mieux que ceux qui se trouvent alternativement dans l'eau et hors de l'eau. Il n'y a pas d'autres causes à la conservation dans la Méditerranée de mortiers qui se décomposent dans les mers à marée. Le sulfate de magnésie ne se renouvelant pas dans l'intérieur des maçonneries, son action est très limitée et ne peut avoir d'influence fâcheuse. Les mortiers faits avec des ciments qui contiennent un peu trop de chaux ou des chaux hydrauliques imparfaitement éteintes peuvent être aussi bien désagrégés quand ils sont constamment immergés ; l'extinction tardive de la chaux libre paraît, en effet, se manifester d'une manière plus énergique dans l'eau de mer que dans l'eau douce.

Quand les mortiers doivent être soumis à une pression d'eau, qu'elle soit constante, comme dans les murs de quais, ou momentanée, comme dans les parties des maçonneries couvertes et découvertes par suite du flux et du reflux, il est indispensable, pour assurer leur conservation, d'obtenir la plus grande imperméabilité possible. On a reconnu depuis quelques années que presque tous les accidents qui étaient survenus dans les travaux à la mer provenaient de ce que la quantité de ciment employée pour la confection des mortiers était trop faible, ou bien étaient dus à la qualité défectueuse du sable. Dans les deux cas, le mortier reste très poreux et il laisse à l'eau de mer un accès facile.

Des accidents arrivés il y a quelques années en Angleterre et en Hollande, dans des travaux importants à la mer, ont fait craindre de voir de pareils faits se reproduire dans tous les ouvrages où l'on a employé le ciment Portland. Ces craintes ne sont nullement fondées. Si on examine, en effet, de quelle façon ont été exécutés ces travaux qui se sont détériorés par la suite, on reconnaît que la méthode employée pour la confection des mortiers laissait beaucoup à désirer et que, d'un autre côté, le dosage en ciment était trop faible. Enfin, les ciments eux-mêmes n'avaient peut-être pas été soumis à un contrôle très sévère

et les procédés de fabrication des usines anglaises étant bien souvent assez primitifs, il n'est pas impossible que les gonflements des mortiers, qui ont été constatés dans quelques endroits, ne soient dus à la présence d'une certaine quantité de chaux libre dans les ciments. M. Quinette de Rochemont a décrit, au congrès des Procédés de construction (Paris 1889), divers accidents survenus à des constructions en béton exécutées en Angleterre. M. Harrisson Hayter, vice-président de la société des Ingénieurs civils anglais, reconnaît que pour quelques-uns de ces ouvrages, on avait employé du ciment renfermant un excès de chaux pour satisfaire aux conditions du cahier des charges. L'excès de chaux est, comme nous l'avons fait observer précédemment, absolument à éviter dans les ciments destinés aux travaux à la mer. Les ciments dont l'indice se trouve à la limite inférieure, c'est-à-dire à 0,40 environ, et qui donnent de bons résultats à l'eau douce ou à l'air, sont dangereux pour les mortiers immergés en eau de mer ; l'indice doit s'élever à 0, 46-0,48 au moins.

Le contrôle exercé depuis quelques années dans les usines Françaises donne, au point de vue de la qualité des ciments employés pour les travaux à la mer, une sécurité aussi grande que possible. En adoptant des dosages convenables, en choisissant le sable avec discernement et en veillant à ce que le mortier soit fabriqué avec soin on est, en somme, assuré d'obtenir des résultats satisfaisants et les accidents sont certainement beaucoup moins à craindre qu'on ne l'a pensé pendant quelque temps. (Voir sur les causes d'altération des mortiers : la *Chimie appliquée à l'art de l'Ingénieur*, par M. Durand-Claye et les Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques, par M. H. Le Chatelier. *Annales des Mines*, mai-juin 1887).

CHAPITRE VII

—

THÉORIES DIVERSES

SUR LA CONSTITUTION DES CHAUX ET DES CIMENTS ET SUR LA PRISE ET LE DURCISSEMENT DES MORTIERS

Nous avons déjà montré l'importance des recherches et des découvertes de Vicat sur les chaux hydrauliques aussi bien au point de vue théorique qu'au point de vue pratique. D'après Vicat, il se forme pendant la cuisson un silicate de chaux et un silicate d'alumine ; la solidification des mortiers est due à l'hydratation de ces deux sels.

Fuchs admettait, en 1833, que la cuisson avait seulement pour effet de rendre la silice soluble, ce n'est qu'au moment du gâchage que la chaux devait se combiner avec la silice pour former un sel hydraté.

Rivot et Chatonay sont les premiers qui aient attribué à l'alumine un rôle important dans la solidification des produits hydrauliques. Vicat avait indiqué seulement que les chaux contenant de l'alumine durcissaient plus vite, mais que la résistance finale était moins élevée que celle des chaux contenant à peu près exclusivement de la silice. D'après Rivot et Chatonay, il existe dans les ciments cuits modérément du silicate de chaux, de l'aluminate de chaux et du silicate d'alumine; ces sels s'hydratent au moment du gâchage et produisent la prise. Mais le silicate est l'élément essentiel de la consolidation; le silicate d'alumine et l'aluminate de chaux ne s'hydratent qu'après la cristallisation du silicate. La formule du silicate de chaux est: SiO^2, 2CaO (1) et celle de l'aluminate: Al^2O^3, 3CaO.

(1) Rivot et Chatonay admettaient, avec la plupart des chimistes de leur temps,

Pettenkofer étend la théorie de Fuchs au ciment Portland, et il pense que celui-ci est composé, après cuisson, de chaux libre enveloppée dans le silicate fondu (1849).

Feichtinger reprit la théorie de Fuchs et de Pettenkofer et formula ainsi la théorie du ciment Portland :

Après la calcination on a un mélange de silice amorphe avec des silicates et beaucoup de chaux libre : pour opérer le durcissement dans l'eau une triple action chimique entre en jeu. D'abord il y a fixation d'eau par tous les éléments, réaction préliminaire (et non simultanée avec la suivante, comme le voulait Fuchs), ensuite a lieu la combinaison de la silice avec la chaux, c'est ce qui constitue le durcissement; finalement l'hydrate de chaux qui reste encore à l'état libre est transformé en carbonate par l'acide carbonique de l'air.

La théorie de Feichtinger fut combattue énergiquement par Winckler qui, tout en admettant la théorie de Fuchs pour les chaux hydrauliques et le ciment Romain, pensait que les réactions étaient différentes pour le ciment Portland; la combinaison de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer devait se produire pendant la calcination. Winckler attribue à l'alumine un rôle important, mais sans le préciser (1858).

Heldt admet également la formation, pendant la cuisson, d'aluminate et de silicate de chaux, mais l'aluminate de chaux constitue une matière inerte et le durcissement du mortier est dû, d'après lui, à la formation d'un silicate de chaux $3SiO^2, 5CaO + 5H^2O$ ou $3(SiO^2, 2CaO) + 3SiO^2, 5CaO + 10H^2O$.

En 1865, M. Frémy reprit la théorie de Rivot et Chatonay et il fut amené à conclure que l'aluminate de chaux avait, dans le durcissement, une influence prépondérante. Trois ans plus tard, il abandonna cette première théorie et il considéra les ciments comme étant composés de silicate et d'aluminate de chaux; mis

que la silice était formée de 1 équivalent de silicium pour 3 équivalents d'oxygène : la formule du silicate de chaux était alors $Sio^3, 3CaO$. Actuellement, on a reconnu définitivement à la silice la formule SiO^2, et le silicate de Rivot et Chatonay devient $SiO^2, 2CaO$.

en contact avec l'eau, l'aluminate se décompose et la chaux mise en liberté se combine avec les silicates qui se comportent comme des pouzzolanes.

Michaëlis partage l'opinion de Fuchs et de Winckler pour les chaux hydrauliques; en ce qui concerne le ciment Portland, il attribue le durcissement à l'hydratation du silicate et de l'aluminate de chaux; il fait remarquer que le ciment Portland convenablement cuit ne contient pas de chaux libre et que, s'il abandonne de l'hydrate de chaux dans l'eau, c'est qu'il est décomposable par ce liquide (1).

M. Landrin, en comparant l'action de la silice à différents états sur l'eau de chaux, attribue à la silice insoluble dans les acides, mais soluble dans une dissolution de potasse, et qu'il appelle silice hydraulique, l'unique cause du durcissement des mortiers. La silice formerait avec la chaux un silicate $3SiO^2$, $4CaO$ qu'il appelle Pouzzo-Portland.

Enfin, M. Merceron-Vicat pense qu'un calcaire argileux, après cuisson, ne renferme qu'un mélange de chaux libre et de silice gélatineuse. Le durcissement du mortier est produit par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux qui durcit l'argile; celle-ci, en séchant, forme un réseau dont les cavités sont bouchées par la chaux grasse qui, sous l'influence de l'air, se transforme peu à peu en carbonate de chaux.

Dès 1876, Knapp avait déjà fait remarquer que les opinions si diverses émises sur la théorie des ciments indiquaient une méthode défectueuse et un manque de clarté dans la manière de poser la question, et il recommandait de voir dans la solidification des mortiers deux causes bien distinctes, l'une mécanique et l'autre chimique.

Lorsque les particules de ciment acquièrent au contact de l'eau une cohésion pierreuse, il y a d'abord, et avant tout, un fait purement méca-

(1) Récemment M. le Dr Michaëlis a développé une nouvelle théorie du durcissement des agglomérants hydrauliques ; d'après lui il ne se produirait pas de combinaisons donnant naissance à des sels cristallisés ; la silice serait à l'état colloïdal et aurait un rôle analogue à celui des colles ou du tannin ; le durcissement se produirait par suite de la dessiccation de la silice. C'est à peu près la même théorie que celle de M. Merceron-Vicat.

nique. Pour que cette action mécanique s'accomplisse, une des conditions nécessaires consiste en certaines réactions chimiques, mais le phénomène ne s'accomplit pas nécessairement si ces réactions chimiques ont lieu.

Ce n'est qu'en 1887 que les recherches expérimentales de M. Le Chatelier sur la constitution des mortiers (1), sont venues apporter à cette question des données réellement positives. Nous donnerons un résumé succinct de ces recherches.

En étudiant séparément le rôle des éléments constitutifs des chaux et des ciments, M. le Chatelier est arrivé à déterminer quelles étaient les combinaisons de la chaux avec la silice, l'alumine et l'oxyde de fer qui pouvaient exister dans ces produits :

En résumé, il paraît exister trois silicates de chaux anhydres différents, dont un seul, le silicate tricalcique SiO^2, 3 CaO, est attaqué par l'eau et susceptible de faire prise ; trois aluminates de chaux qui font prise tous très rapidement dans l'eau ; des ferrites de chaux qui tous s'éteignent et gonflent comme la chaux vive, enfin des silicates multiples nombreux dont aucun parmi ceux étudiés jusqu'ici n'est altérable par l'eau.

Les seuls sels hydratés correspondants pouvant exister en présence d'un excès de chaux sont :

Le silicate :	SiO^2, CaO, 2,5 HO.
L'aluminate	Al^2O^3, 4CaO, 12 HO.
Le ferrite	Fe^2O^3, 4CaO, Aq.

Ces sels se décomposent en présence d'un excès d'eau en abandonnant de la chaux.

M. Le Chatelier a fait voir, en examinant les propriétés du silicate bicalcique SiO^2, 2CaO, que la pulvérisation spontanée de certaines roches de ciment était due à la présence de ce silicate qui se réduit toujours en poudre en refroidissant.

Etude microchimique des ciments — Ciments anhydres. — L'examen au miscroscope d'une lame mince taillée dans une roche de ciment Portland montre immédiatement deux éléments qui se retrouvent sans exception dans tous les échantillons :

1° Des cristaux incolores à double réfraction faible dont les sections

(1) *Annales des Mines*, mai-juin 1887. Dunod éditeur,

carrées ou hexagonales. à contours très nets, ressemblent beaucoup à celles du cube. C'est de beaucoup l'élément le plus abondant.

2° Dans l'intervalle de ces cristaux un remplissage dont la couleur, toujours foncée, varie du jaune rouge au brun verdâtre, dont la double réfraction est plus forte que celle de la matière précédente, mais qui ne possède aucuns contours cristallins propres.

3° Outre ces deux éléments essentiels, on rencontre souvent des éléments accessoires, variant d'un échantillon à l'autre :

a) Des sections cristallines de formes et de dimensions analogues aux premières citées, mais qui s'en distinguent par leur couleur légèrement jaunâtre, une absence complète de transparence, et des stries très fines inclinées l'une sur l'autre d'environ 60 degrés. Cet élément, quoique peu abondant se trouve pourtant dans presque tous les échantillons de ciments de bonne qualité.

b) Des cristaux très petits, à double réfraction assez énergique pour donner les couleurs de polarisation. Cet élément toujours peu abondant manque souvent complètement. Il se trouve surtout dans les ciments insuffisamment cuits.

c) Des zones sans action sur la lumière polarisée, caractère négatif, qui ne donne aucune indication probante.

Cette étude microchimique, insuffisante à elle seule pour faire connaître la nature des composés cristallisés observés, révèle pourtant, quand on la rapproche de l'absence de fusion des ciments pendant leur cuisson, ce fait très important :

Les cristaux pseudocubiques, éléments de première consolidation, n'ont pas fondu, mais se sont formés par précipitation chimique au milieu de la matière brune fusible, élément de seconde consolidation, qui, après avoir servi de fondant et rendu possible les réactions chimiques, s'est solidifiée par refroidissement en remplissant tous les intervalles restés vides.

. . . .

Les cristaux pseudocubiques, éléments essentiels des ciments, sont formés de silice et de chaux ainsi que les cellules opaques striées et peut-être aussi les cristaux à double réfraction énergique. Le fondant coloré qui remplit les vides laissés par tous ces cristaux est un silicate double d'alumine, de fer et de chaux.

De ces composés le premier seul paraît assez altérable pour pouvoir jouer un rôle important pendant le durcissement.

La composition du silicate de chaux qui, d'après tous les indices, doit être l'élément essentiel des ciments, restait cependant à déterminer d'une façon exacte. M. le Chatelier avait fait voir précédemment qu'en préparant un mélange de silice et de chaux, en proportions convenables, et en le portant à une température élevée on n'obtient pas de résultats ; on a toujours un mélange d'un silicate moins basique avec de la chaux libre.

Mais en examinant au microscope polarisant des grappiers de chaux hydrauliques à peu près exempts d'alumine et d'oxyde de fer, M. Le Chatelier reconnut qu'ils étaient presqu'entièrement composés de cristaux identiques à ceux des ciments, le fondant coloré faisant à peu près défaut. L'analyse de ces grappiers devait donc lui faire connaître la composition des cristaux des ciments. Il trouva que la teneur en silice et en chaux répondait à très peu près à la formule SiO^2, 3CaO.

M. Le Chatelier conclut en ces termes :

Cette étude chimique sur les ciments Portland cuits montre donc qu'ils sont essentiellement formés d'un silicate de chaux différant peu de la formule SiO^2,3 CaO qui est l'élément actif du durcissement, et que le composé s'est produit par précipitation chimique au sein d'un silicate multiple fondu qui a servi de véhicule à la silice et à la chaux pour permettre leur combinaison, mais qui reste sensiblement neutre pendant le durcissement.

Ciments hydratés. — Dans une briquette de ciment Portland conservée dans l'eau, on trouve tout d'abord des cristaux hexagonaux assez volumineux qui sont de l'hydrate de chaux, puis des cristaux extrêmement petits qui sont détruits instantanément par les sels ammoniacaux en laissant des flocons gélatineux de silice ;ils sont constitués par un silicate de chaux dont la composition doit se rapprocher de la formule SiO^2, CaO, 2,5 HO, c'est le seul silicate qui ait pu être reproduit synthétiquement et qui puisse exister en présence d'un excès de chaux.

Enfin on observe des cristaux groupés en sphérolithes qui sont probablement de l'aluminate de chaux Al^2O^3, CaO, 12HO, le seul aluminate également qui soit stable en présence d'un

excès de chaux. L'existence de ce sel est certaine dans les ciments à prise rapide tels que le Vassy.

Si maintenant, dit M. Le Chatelier, nous rapprochons les résultats auxquels nous a conduits l'étude des ciments cuits et des ciments hydratés, nous sommes amenés à conclure que la réaction fondamentale qui amène le durcissement est le dédoublement d'un silicate basique de chaux en silicate de chaux monocalcique et hydrate de chaux.

$$SiO^2, 3CaO + Aq = SiO^2, CaO, 2,5\ HO + 2CaO, HO.$$

Réaction analogue à celle qui accompagne la prise du silicate dibarytique.

Il se formerait accessoirement un aluminate de chaux basique dont la rapidité d'hydratation interviendrait dans la prise plus ou moins rapide des divers ciments :

$$Al^2O^3, 3CaO + CaO, HO + Aq = Al^2O^3, 4CaO, 12HO\ (1).$$

Cette seconde conclusion n'étant annoncée qu'avec réserve.

Enfin le fer ne jouerait certainement aucun rôle dans la prise des ciments Portland ; il ne se forme pas de ferrite de chaux. On le reconnaîtrait immédiatement à la coloration brune qu'il prendrait sous l'influence de l'acide carbonique par suite de la mise en liberté d'oxyde de fer hydraté. Il intervient, au contraire, d'une façon très nette dans les ciments à prise rapide.

En ce qui concerne la prise et le durcissement, M. Le Chatelier établit qu'ils sont dûs à des phénomènes d'ordre chimique et que la cristallisation qui accompagne la prise de tous les corps durcissant au contact de l'eau résulte de la production préalable d'une dissolution sursaturée.

(1) M. Le Chatelier avait admis pour l'aluminate hydraté la formule Al^2O^3, 4CaO parce que les analyses de divers échantillons d'aluminate de chaux hydraté lui avaient donné des chiffres se rapprochant davantage de cette formule que de celle Al^2O^3, 3CaO : depuis il a adopté cette dernière formule ; la réaction en présence de l'eau se traduirait par une simple hydratation Al^2O^3, 3CaO + Aq = Al^2O^3, 3CaO, 12HO. En étudiant la formation du sulfoaluminate de chaux, nous avons été conduits également à reconnaître la formule Al^2O^3, 3CaO pour le sel hydraté.

La cristallisation qui accompagne le durcissement des mortiers résulte de la différence de solubilité des corps qui font prise, les premiers se trouvant à l'état d'équilibre instable en présence de l'eau et ne pouvant y subsister que momentanément.

La production de dissolutions sursaturées joue encore un autre rôle dans les phénomènes de durcissement en influant sur la forme des cristaux qui se précipitent. Ceux-ci prennent très fréquemment, dans ces conditions, un développement anormal suivant une direction et se présentent alors sous la forme de longs prismes extrêmement déliés, de véritables fils dont la longueur peut dépasser 100 fois l'épaisseur.

Ainsi, les cristaux qui se forment pendant le durcissement sont fréquemment, sinon toujours, des prismes extrêmement déliés, soudés par une de leurs extrémités autour de points centraux de façon à constituer de petits groupements sphériques.

Tels sont, résumés très brièvement, les principaux résultats obtenus par M. Le Chatelier. La théorie émise par ce savant, basée d'ailleurs sur des données précises, permet d'expliquer simplement les faits que l'on observe dans les essais de laboratoire ou dans la pratique, et elle présente ainsi un grand caractère de probabilité. La voie toute nouvelle ouverte par M. Le Chatelier ne manquera pas de provoquer de nouvelles recherches sur les produits hydrauliques et on peut espérer que dans un avenir peu éloigné on aura éclairci complètement cette question qui, jusqu'en ces derniers temps, a été l'objet de tant de controverses.

ANNEXE I

—

INFLUENCE
DU CHLORURE DE CALCIUM ET DU SULFATE DE CHAUX
SUR LA PRISE
ET LE DURCISSEMENT DES MORTIERS

L'étude de l'action de l'eau de mer sur les mortiers, soit au moment de la prise, soit pendant leur durcissement, nous a conduits à examiner le rôle de chacun des éléments qui entrent en quantité appréciable dans la composition de l'eau de mer. Nous avons reconnu que le chlorure de magnésium et le sulfate de magnésie avaient seuls une action bien nette sur la prise ; comme le premier se transforme en chlorure de calcium et le second en sulfate de chaux en présence de la chaux des mortiers, nous avons étudié spécialement ces deux sels.

Les résultats que nous avons obtenus jusqu'à ce jour, et que nous allons résumer brièvement, nous ont permis de confirmer certains points déjà acquis, de donner l'explication de faits encore peu connus et d'indiquer quelques applications utilisables dans le domaine de la pratique.

1. Rôle du chlorure de calcium (1). — 1° *Action du chlorure de calcium en solutions faibles. — Prise.* — Le ciment Portland gâché avec une solution contenant quelques grammes par

(1) Voir *Annales de la construction,* mai et juin 1888 (Baudry et Cie éditeurs) et les comptes rendus de la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale. — Octobre 1890.

litre de chlorure de calcium fait prise plus lentement que s'il a été gâché avec de l'eau pure. Quand la solution de chlorure est concentrée, à 100-400 grammes par litre, la prise est au contraire très rapide. Voici quelques expériences faites à ce sujet sur 4 échantillons de ciment.

Solution de CaCl en grammes par litres	Durée de prise du ciment par			
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4
2	0h,5	1h,5	8h	1h,34
5	0, 8	10,	12,	2,
10	8, 18	10,	14,	5, 50
20	1,	12,	10, 30	8,
40	4, 35	8,	6, 30	8, 35
60	3, 20	6,	4,	6,
100	0, 3	0, 20	0, 30	3, 30
200	0, 3	0, 9	0, 5	0, 25
300	0, 2	0, 8	0, 3	0, 5

L'influence du chlorure de calcium en solution faible sur la prise du ciment Portland peut être attribuée à ce que les sels qui déterminent la prise entrent en dissolution beaucoup plus lentement dans la solution de chlorure que dans l'eau pure (1). La chaux hydratée, agitée dans un grand excès de liquide, se dissout déjà beaucoup moins vite dans la solution de chlorure que dans l'eau distillée. En opérant avec de l'aluminate de chaux finement pulvérisé (Al^2O^3, 1,5 CaO), nous avons reconnu que l'influence du chlorure de calcium était encore plus nettement marquée.

20 grammes d'Al^2O^3, 1,5 CaO ont été agités dans 300 centimètres cubes d'eau distillée ; de temps en temps, on a prélevé la moitié du liquide qui a été remplacé à chaque fois par de l'eau distillée. Dans le liquide clair, on a dosé la chaux et l'alumine en dissolution. La même opération a été répétée, mais en

(1) La cristallisation qui accompagne la prise de tous les corps durcissant dans l'eau résulte de la production préalable d'une dissolution sursaturée... La solubilité des corps mis à durcir au contact de l'eau influe sur la rapidité de la cristallisation et par suite, sur celle de la prise. — H. Le Chatelier, *Annales des Mines*, mai-juin 1887,

remplaçant l'eau distillée par une solution de CaCl à 30 grammes par litre. Voici les résultats obtenus.

Numéros des essais	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur			
	Eau distillée		CaCl. 30 grammes par litre	
	CaO	Al^2O^3	CaO	Al^2O^3
1	0gr,649	0gr,850	0gr,147	0gr,0[illegible]0
2	0, 649	0, 980	0, 354	0, 500
3	0, 324	0, 300	0, 206	0, 460
4	0, 309	0, 230	0, 118	0, 200
5	0, 395	0, 220	0, 091	0, 012
6	0, 366	0, 210	0, 061	0, 110
7	0. 366	0, 240	0, 061	0, 080
8	0, 310	0, 190	0, 040	0, 090
9	0, 278	0, 260	0, 031	0, 080
10	0, 334	0, 240	0, 030	0, 060

NOTA. — La chaux à été dosée à l'aide d'une liqueur titrée, l'alumine a été dosée en poids.

Si l'on gâche en pâte ferme un ciment de Vassy, à prise rapide, avec une solution de chlorure de calcium à 20-40 grammes par litre, la prise est à peu près la même qu'avec l'eau pure. Si, au contraire, on délaye le ciment en bouillie claire en employant la même solution, il ne se produit aucune prise et la pâte ne durcit pas.

Le ciment Portland traité de la même manière prend très lentement mais il acquiert une dureté comparable à celle qu'il aurait si on le gâchait à l'eau douce.

Les solutions faibles de chlorure de calcium n'ont aucune influence appréciable sur les ciments exempts d'alumine, comme certains ciments de grappiers qui sont composés à peu près exclusivement de silicate de chaux.

Nous avons conclu de ces faits :

1° Que dans le ciment Portland, l'aluminate de chaux existe en faible quantité et qu'il agit d'une manière très active sur la prise mais très peu sur le durcissement qui est dû uniquement au silicate de chaux.

2° Que dans le ciment de Vassy c'est l'aluminate de chaux qui est l'élément essentiel ; c'est lui qui détermine la prise et le durcissement. Le rôle du silicate de chaux dans ce ciment doit être très peu important, du moins pendant les premiers temps du durcissement.

3° Que dans les phénomènes de prise, les quantités relatives des éléments en présence ont une action prépondérante. La solution de chlorure, en présence d'une grande quantité d'aluminate de chaux, ne peut pas empêcher celui-ci de s'hydrater et de cristalliser. Si, au contraire, on met une petite quantité d'aluminate dans un excès de la solution de CaCl, l'action de celle-ci prédomine et l'aluminate ne peut pas entrer en dissolution.

La solution faible de CaCl a la propriété de provoquer l'extinction rapide de la chaux vive. Un ciment contenant un excès de chaux, gâché à l'eau pure, gonfle et se désagrège par suite de l'expansion tardive de la chaux libre. Ce même ciment, gâché avec une solution de chlorure de calcium à 30-60 grammes par litre, ne présente pas de gonflement parce que la chaux libre qu'il renferme à pu s'éteindre avant que la prise ne se soit produite. Les expériences suivantes mettront en évidence le rôle du chlorure de calcium à cet égard.

50 grammes de chaux surcuite et pulvérisée de manière à passer complètement à travers un tamis de 900 mailles par centimètre carré ont été gâchés avec 20 centimètres cubes de liquide.

1° Gâchage à l'eau distillée :

Température initiale	18°
— après 5 minutes	19
— — 10 —	20
— — 15 —	25
— — 20 —	25

La température reste stationnaire pendant quelque temps puis elle revient à 20°. L'extinction de la chaux n'est complète qu'au bout de 48 heures environ.

2° Gâchage avec une solution de CaCl à 30 grammes par litre :

Température initiale	. . . .	18°
— après 5 minutes	. . . .	19
— — 10 —	. . . .	21
— — 15 —	. . . .	35
— — 20 —	. . . .	90
— — 25 —	. . . .	98
— — 30 —	. . . .	90

Au bout de 30 minutes la chaux était complètement éteinte.

3° Gâchage avec une solution de CaCl à 60 grammes par litre :

Température initiale	. . . .	18°
— après 5 minutes	. . . .	19
— — 10 —	. . . .	24
— — 15 —	. . . .	90
— — 20 —	. . . .	98
— — 25 —	. . . .	99
— — 30 —	. . . .	95

Au bout de 30 minutes la chaux était complètement éteinte.

2° *Solutions concentrées de chlorure de calcium.* — Nous avons fait voir précédemment que le ciment Portland, gâché avec une solution contenant de 100 à 400 grammes par litre de chlorure de calcium, faisait prise en très peu de temps. La prise est accompagnée d'une forte élévation de température.

Cependant ce fait ne se manifeste que si le ciment est de fabrication récente ; avec un ciment éventé la prise reste lente ; il ne se produit pas d'élévation de température et la pâte gonfle et se décompose parfois complètement.

Le durcissement que le ciment frais gâché, avec la solution concentrée de CaCl, est susceptible d'acquérir en peu de temps est considérable ; en voici un exemple.

Ciment pur gaché	Résistance par cent. carré à la traction après						Résistance par cent. carré à la compression après					
	1 heure	6 heures	48 heures	7 jours	28 jours	1 an	1 heure	6 heures	48 heures	7 jours	28 jours	1 an
	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
1° avec une solution de CaCl à 300gr par litre.	5,0	16,7	41,0	48,5	50,0	57,0	67,0	127,5	200,0	257,5	325,0	460,0
2° avec de l'eau pure	0	0	12,2	25,9	36,1	52,0	0	0	109,5	128,4	313,0	470,0

Quand on gâche le ciment en pâte pure avec la solution concentrée de CaCl, il n'y a aucun inconvénient à continuer le gâchage quand la pâte commence à s'échauffer. Il est avantageux, quand on veut faire un scellement, par exemple, de gâcher la pâte assez claire et de ne l'employer qu'au moment où elle a déjà une température élevée et où elle a pris une consistance plastique ; une fois mise en place elle se solidifie très vite.

Le mortier de ciment gâché avec la solution concentrée de CaCl se désagrège si on le met dans l'eau quelques instants après la prise ; mais 15 ou 20 heures après on peut l'immerger sans qu'il perde rien de sa dureté.

L'action du chlorure de calcium, en solution concentrée, sur le ciment Portland, est due à ce que l'aluminate de chaux est attaqué très énergiquement par cette solution ; tandis qu'il est très peu soluble, comme on l'a vu précédemment, dans la solution faible de CaCl, il se dissout au contraire en grande quantité dans la solution concentrée.

En agitant 20 grammes d'aluminate de chaux finement pulvérisé dans 200 centimètres cubes de solution contenant 300 grammes de CaCl par litre, on a constaté les dissolutions suivantes de chaux et d'alumine :

Temps après lequel on a prélevé un échantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur	
	CaO	Al^2O^3
30 minutes	1gr,362	3gr,700
3 heures	5, 472	13, 800
6 heures	7, 904	24, 200
24 heures	10, 336	26, 600
48 heures	7, 900	18, 000

Quand on agite du ciment frais dans une solution concentrée de CaCl, on observe qu'il se dissout, non seulement de l'alumine, mais aussi de l'oxyde de fer. La vitesse de dissolution n'est pas la même pour chacun de ces corps et ils se dissolvent

également d'une façon différente selon le degré de cuisson du ciment, comme le montre l'expérience suivante :

Temps après lequel on a prélevé un échantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur		
	CaO	Al^2O^3	Fe^2O^3
1° Ciment cuit normalement. — Roches noires			
3 minutes	3gr,648	2gr,130	0gr,370
30 minutes	3, 800	1, 530	0, 570
60 minutes	3, 800	0, 650	1, 150
24 heures	2, 120	0, 160	0, 940
2° Ciment imparfaitement cuit. — Roches grises			
3 minutes	9gr,120	2gr,180	0gr,420
30 minutes	7, 590	2, 020	0, 780
60 minutes	6, 384	1, 560	0, 940
6 heures	4, 251	0, 860	0, 740
24 heures	2, 584	0, 160	0, 740
3° Incuits jaunes			
3 minutes	14gr,590	5gr,600	0gr,600
30 minutes	15, 200	4, 400	2, 500
60 minutes	11, 840	2, 600	2, 500
24 heures	4, 560	0, 500	1, 600

Si, après avoir agité pendant quelques minutes le ciment dans la solution de chlorure, on jette le tout sur un filtre, le liquide filtré se trouble au bout de quelques minutes et il se forme un précipité abondant dans lequel on aperçoit des cristaux assez volumineux ; ce sont des cristaux d'oxychlorure de calcium. Le précipité est d'autant plus abondant que le ciment est moins cuit. Avec un ciment très cuit, il ne se produit qu'un léger trouble, avec l'aluminate anhydre le liquide filtré reste tout-à-fait clair.

Quand on étend d'eau la liqueur contenant en dissolution l'alumine et le fer, il se produit un précipité blanc, floconneux et tellement abondant, avec les ciments peu cuits surtout, que la liqueur devient pâteuse, ce précipité renferme l'alumine et le fer, qui étaient primitivement en dissolution ; quand, après filtration, on l'abandonne à l'air, il devient bientôt brun par

suite de la décomposition du ferrite de chaux par l'acide carbonique.

— En agitant un ciment éventé dans une solution concentrée de CaCl, on observe que la dissolution d'alumine est très faible ; celle de l'oxyde de fer reste encore assez importante.

Temps après lequel on a prélevé un echantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur		
	CaO	Al^2O^3	Fe^2O^3
10 minutes	0gr,728	0gr,000	0gr,000
6 heures	1, 092	0, 090	0, 110
24 heures	1, 458	0, 030	0, 230
1 mois	2, 155	0, 030	0, 230
2 mois	2, 074	0gr,280	
3 mois	1, 550	0, 160	
1 an	1, 520	traces	

2. Rôle du sulfate de chaux. — On connaît depuis longtemps l'action du sulfate de chaux sur la prise du ciment Portland ; on l'utilise pour obtenir un ralentissement de prise ; mais on n'a jamais donné d'explication satisfaisante de cette propriété du sulfate de chaux. On attribue également au sulfate de chaux produit par la décomposition du sulfate de magnésie, la destruction de certains mortiers immergés en eau de mer. Cette hypothèse n'a été jusqu'à présent confirmée par aucun fait précis.

Nous nous sommes proposé de rechercher quel est le rôle exact du sulfate de chaux et voici le résultat de nos recherches jusqu'à ce jour.

Prise. — Le ralentissement de prise que procure l'addition de sulfate de chaux au ciment est variable avec la quantité de sulfate employée.

Influence de la quantité de sulfate sur la prise

Quantité de sulfate de chaux (gypse) ajouté à 100 grammes de ciment	Prise du ciment pur à l'eau douce					
	1		2		3	
	commt	fin	commt	fin	commt	fin
0gr,0	0h,7′	0h,22′	0h,7′	0h,15′	0h,2′	0h,5′
0, 5	0, 50	2, 43	0, 10	0, 17	0, 2	0, 5
1, 0	2, 40	4, 50	3, 50	5, 00	1, 30	2, 35
1, 5	2, 57	5, 17	3, 50	5, 00	3, 20	5, 15
2, 0	3, 00	5, 20	4, 20	6, 45	4, 00	7, 00
3, 0	3, 00	6, 40	3, 45	7, 00	5, 00	7, 00
4, 0	3, 30	7, 00	5, 00	7, 00	5, 00	7, 00

Influence du temps sur la prise des ciments mélangés avec du sulfate de chaux

Désignation du ciment	Prise à l'eau douce	
	commt	fin
1° Ciment mélangé avec 3 °/₀ de gypse :		
Essai fait le jour du mélange	1h,00′	7h,00′
— 4 jours après	0, 5	2, 15
— 7 —	0, 5	0, 20
— 11 —	0, 8	0, 30
— 15 —	0, 5	0, 30
— 19 —	0, 7	0, 35
— 24 —	0, 5	0, 25
— 32 —	0, 10	0, 30
— 41 —	0, 45	5, 30
2° Ciment mélangé avec 2 °/₀ de gypse :		
Essai fait le jour du mélange	5, 00	19, 0
— 12 jours après	4, 40	14, 0
— 21 —	0, 18	0, 50
3° Ciment mélangé avec 1 °/₀ de gypse :		
Essai fait le jour du mélange	5, 30	8, 30
— 8 jours après	0, 18	2, 30
— 15 —	0, 11	0, 20
4° Ciment mélangé avec 1 °/₀ de gypse :		
Essai fait le jour du mélange	6, 00	9, 30
— 8 jours après	4, 30	8, 00
— 15 —	0, 15	0, 30
— 30 —	»	7, 00

Mais l'action du sulfate de chaux sur la prise ne persiste pas toujours, et très souvent il arrive que si le ciment mélangé de sulfate est gâché assez longtemps après que le mélange a été fait, on observe une prise très rapide. Ce fait se produit surtout avec les ciments qui prennent très vite quand ils ne sont pas mélangés avec du sulfate et qui, lorsque le mélange a été fait, restent exposés pendant quelques jours à l'air. Voir à ce sujet quelques résultats d'expériences p. 326.

Quand le ciment est conservé à l'abri de l'air, la prise peut redevenir rapide après un temps très long. Exemple :

Ciment mélangé avec 2 °/₀ de gypse — Conservé dans un flacon bien fermé.

Essai fait le jour du mélange.	Prise	— Commencement :	3^h	fin :	$6^h,25'$
— après 1 mois	—	—	2, 50	—	5
— après 2 mois	—	—	1, 30	—	7
— après 5 mois	—	—	10	—	18

Les ciments additionnés de sulfate de chaux présentent cette particularité de faire prise souvent plus rapidement quand ils sont gâchés avec de l'eau de mer que lorsqu'ils sont gâchés à l'eau douce.

Quand un ciment additionné de sulfate de chaux est resté quelque temps à l'air et qu'il est redevenu à prise rapide, il prend plus vite quand on le gâche en pâte claire avec excès d'eau que si on le gâche on pâte ferme avec très peu d'eau. C'est le contraire de ce qui se passe toujours avec les ciments non mélangés.

Durcissement. — L'addition de petites quantités de sulfate de chaux au ciment Portland a pour résultat d'augmenter la résistance. Toutefois, quand le ciment est conservé dans l'eau de mer et que la proportion de sulfate ajoutée dépasse 1 à 2 °/₀, le mortier ne tarde pas à présenter des traces d'altération et les briquettes sont parfois complètement désagrégées (1).

Si le ciment additionné de sulfate reste en sacs pendant plusieurs semaines, il présente de très faibles résistances pendant les premiers temps du durcissement.

(1) Voir à ce sujet l'étude de M. Feret. *Annales des Ponts et Chaussées*, mars 1890, page 67.

Résistance à la traction par centimètre carré — Quantité de sulfate de chaux ajoutée au ciment

Désignation du mortier	Temps écoulé depuis le gâchage	0		1 %		2 %		3 %		4 %	
		eau douce	eau de mer	eau douce	eau de mer	eau douce	eau de mer	eau douce	eau de mer	eau douce	eau de mer
1° Essais exécutés sur le ciment frais											
		kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Ciment pur	7 jours	34,2	39,2	45,5	53,1	37,5	43.0	30,6	31,5	18,6	25,9
	28 jours	47,4	51,6	51,9	60,6	47,5	58,7	55,7	63,4	34,0	26.2 (1)
	3 mois	51,7	54,5	55,1	50,7	59,0	65,9	62,1	69,3 (1)	65.2	25,6 (4)
	6 mois	50,9	51,5	59,2	59,7	57,0	50,0 (1)	63,2	67,0 (3)	72,4	0 (4)
	1 an	60,6	25,1	59,7	48,3	63,9	31,9 (3)	65,6	72,0 (3)	80,0	0
Mortier 1 : 3	7 jours	15,7	14,9	17,7	17,0	18,5	16,2	13,0	13.4	8,9	9.9
	28 jours	23,4	18,0	26,6	23,1	26,6	20,2	25,2	18,4	20,5	0 (4)
	3 mois	30,0	21,6	34,2	25,9	32,7	24,2	33,6	23,6	31.0	0
	6 mois	32,7	23,1	37,7	25,7	35,7	28,0	38,2	29,2	36,1	0
	1 an	35,5	28,2	37,7	27,5	36,0	31,9	37,7	31,0	41,5	0
Mortier 1 : 3 Briquettes conservées à l'air	7 jours	16,9	»	19,7	»	19,9	»	15,5	»	11,7	»
	28 jours	28,6	»	35,9	»	33,7	»	29,5	»	26,9	»
	3 mois	35,2	»	43,4	»	42,9	»	40,1	»	42,2	»
	6 mois	44,2	»	45,2	»	45,6	»	50.5	»	46,9	»
	1 an	53.0	»	49,5	»	50,4	»	51,1	»	58,2	»
2° Essais exécutés sur le même ciment conservé en sacs pendant 2 mois											
Ciment pur	7 jours	28,0	35,6	28,5	34,1	21,0	25,2	15,0	13,4	11,6	12,6
	28 jours	47.0	48,5	42,9	48 2	37 5	48,9	34,2	40,9	22,9	16,5 (2)
	3 mois	52,2	63,1	51,7	56,1	53,3	50,9	48,7	48,1 (1)	50,9	37,7 (3)
	6 mois	55,2	49,2	54,9	55,5	49,2	52,0	51,2	52.0 (2)	58,6	43,4 (3)
	1 an	59,7	17,6	56,0	27,7	53.0	50,5	58,5	51,6 (2)	54,7	46,0 (3)
Mortier 1 : 3	7 jours	14,1	15,2	15,2	13,6	15,7	13,0	6,6	7,0	5.1	5,6
	28 jours	23,7	22,1	22,0	22,2	21.5	18,0	21,6	18,0	17,2	12,1
	3 mois	29,7	27,0	29,2	26,2	28,2	20,9	33,7	25,0	28,5	19,5
	6 mois	31,9	27.5	31,9	24,4	34.2	24,7	35,7	25,6	37,3	22.4
	1 an	35,6	29,4	36,1	27,5	34,4	26 5	38,0	25,6	36,5	26,2
Mortier 1 : 3 Briquettes conservées à l'air	7 jours	13,7	»	19,1	»	15,7	»	6,2	»	5,1	»
	28 jours	28,6	»	31,0	»	28,6	»	26,9	»	23,7	»
	3 mois	37,6	»	41,[illegible]	»	35.6	»	36,6	»	33,7	»
	6 mois	47 2	»	49,9	»	43,7	»	47,5	»	43,0	»
	1 an	56,7	»	59,9	»	51,1	»	57,7	»	56,7	»

(1) Briquettes présentant quelques traces d'altération.
(2) Briquettes fendillées.
(3) Briquettes très fendillées, gonflement marqué.
(4) Briquettes complètement décomposées.

Essais chimiques. — Si on agite du ciment en poudre fine dans un poids égal d'eau distillée et que l'on prélève de temps en temps un échantillon de la liqueur claire, on observe que la quantité de sulfate de chaux en dissolution est plus ou moins grande après quelques minutes ; dans les échantillons suivants, on en constate de moins en moins et, au bout d'un temps qui correspond au temps de prise du ciment, on n'en trouve plus que des traces ou même pas du tout. La proportion de chaux en dissolution augmente au contraire à mesure que celle du sulfate diminue.

La quantité de sulfate de chaux qui se dissout immédiatement est plus grande avec les ciments peu cuits ; elle est très élevée avec les ciments de Vassy et très faible quand il s'agit de ciments de grappiers qui contiennent peu de sulfate de chaux.

Parmi le grand nombre d'expériences que nous avons faites pour nous rendre compte de l'allure de la dissolution du sulfate de chaux, nous ne rapporterons que les suivantes :

Désignation du ciment	Temps après lequel on a prélevé un échantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur	
		CaO	SO^3,CaO
1° Ciment Portland contenant environ 1,50 % de SO^3,CaO. Cuisson normale. Prise en 5 heures	5 minutes	1gr,550	1gr,564
	3 heures	2. 108	0, 204
	6 heures	2, 232	0, 000
2° Ciment Portland contenant environ 2 % de SO^3,CaO. Cuisson normale. Prise en 4 heures	5 minutes	2, 432	4, 182
	3 heures	3, 648	1, 281
	6 heures	3, 490	0, 000
3° Ciment Portland contenant environ 2 % de SO^3,CaO. Cuisson incomplète. Prise en 8 heures	5 minutes	2, 128	12, 529
	3 heures	2, 885	6, 528
	6 heures	3, 074	4, 896
	24 heures	4, 560	traces
4° Ciment de Vassy à prise rapide. Contenant 5 % de SO^3,CaO	5 minutes	1, 520	15, 147
	3 heures	3, 496	0, 000
	24 heures	2, 736	0, 000
5° Ciment de grappiers à prise très lente, contenant 1 % de SO^3,CaO	5 minutes	0, 912	0, 583
	6 heures	1, 520	0, 000
	24 heures	1, 520	0, 000

Avec les ciments additionnés de plâtre après cuisson, on observe que le sulfate de chaux reste en dissolution assez long-

temps après que la prise a eu lieu, mais si le ciment contient une certaine quantité d'alumine, le sulfate de chaux finit par disparaître, même quand on en a ajouté au ciment une grande proportion. Au contraire, on continue à constater sa présence dans le liquide clair si le ciment auquel il a été ajouté contenait très peu d'alumine.

Désignation du ciment	Temps après lequel on a prélevé un échantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur	
		CaO	SO^3,CaO
1° Ciment Portland. — Teneur en Al^2O^3 = 7 %	24 heures	1gr,012	1gr,853
	48 heures	1, 308	0, 810
	10 jours	1, 520	0, 035
	21 jours	1, 520	0, 035
	24 jours	1, 428	traces
	8 mois	1, 300	0, 000
2° Ciment de Vassy. — Teneur en Al^2O^3 = 9 %	10 minutes	1, 395	1, 564
	6 heures	1, 550	1, 156
	24 heures	1, 395	1, 156
	23 jours	1, 360	0, 000
3° Ciment de laitier. — Teneur en Al^2O^3 = 15 %	24 heures	1, 064	2, 499
	48 heures	0, 912	0, 583
	10 jours	1, 060	traces
	21 jours	1, 140	0, 000
	24 jours	0, 912	0, 000
	8 mois	0, 975	0, 000
4° Ciment de grappiers. — Teneur en Al^2O^3 = 1,5 %	24 heures	1, 300	1, 275
	1 mois	1, 300	1, 802
	2 mois	1, 300	1, 802
	6 mois	1, 300	1, 452
5° Chaux du Teil. — Teneur en Al^2O^3 = 1 %	24 heures	1, 300	1, 513
	1 mois	1, 462	1, 513
	2 mois	1, 300	1, 749
	6 mois	1, 300	1, 452

Des ciments divers ont été additionnés de 10 % de sulfate de chaux et traités comme précédemment, c'est-à-dire que l'on a agité la poudre dans un poids égal d'eau distillée et des échantillons de la liqueur ont été prélévés de temps en temps, on a obtenu les résultats exposés dans le tableau ci-dessus.

En opérant sur un mélange de 40 % de SO^3, CaO et de 60 %

d'aluminate de chaux Al^2O^3, 1,5 CaO, finement pulvérisé, on a constaté les résultats suivants :

Temps après lequel on a prélevé un échantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur		
	CaO	Al^2O^3	SO^3, CaO
10 minutes	traces	traces	1,632
3 heures.	0,155	0,600	1,514
6 —	0,155	0,700	1,514
24 —	0,155	0,750	0,000
48 —	0,232	0,300	0,000
1 mois	0,310	0,300	0,000

Toutes ces expériences pouvaient faire prévoir que le sulfate de chaux devait se combiner avec l'aluminate de chaux. Nous avons réussi, en effet, à obtenir ce sel cristallisé en mélangeant une solution saturée de sulfate de chaux avec une solution également saturée d'aluminate de chaux.

Au bout de quelques heures les parois du flacon se tapissent de cristaux groupés en sphérolithes. En ajoutant au liquide une certaine quantité d'eau de chaux, il se forme en peu de temps un précipité floconneux très abondant. Ce précipité recueilli sur un filtre et essoré a la composition suivante (moyenne de 6 échantillons) :

Al^2O^3 : 6,24 — CaO : 18,50 — SO^3 : 11,70 — Eau : 62,07.

Ce qui donne pour 100 de sel anhydre :

Al^2O^3 : 17,0 — CaO : 50,9 — SO^3 : 32,0.

Ces chiffres conduisent à la formule (Al^2O^3, 3CaO) 2,5 (SO^3, CaO).

Ce sel perd presque toute son eau au-dessous de 100°; il est, complètement deshydraté vers 300°. Il est, comme nous l'avons vu, insoluble dans l'eau de chaux ; il est décomposé par l'eau quand la teneur en CaO dissoute s'abaisse au-dessous de 0^{gr},150 à 0^{gr},200 par litre.

La formation du sulfoaluminate de chaux permet d'expliquer les faits que nous avons exposés plus haut au sujet de la prise et du durcissement.

On sait que l'aluminate de chaux est insoluble dans une solution saturée de chaux. Si on met en présence de l'aluminate de chaux, du sulfate de chaux et de la chaux libre, il en résulte que la combinaison du sulfate de chaux avec l'aluminate ne peut se produire que très lentement parce que l'aluminate ne peut pas s'hydrater par suite de la dissolution immédiate de la chaux. Ainsi, un mélange d'aluminate de chaux en poudre, de sulfate de chaux et de chaux éteinte ayant été agité dans un excès d'eau distillée, on a constaté les résultats suivants :

Temps après lequel on a prélevé un échantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur		
	CaO	Al^2O^3	SO^3, CaO
	gr.		gr.
10 minutes	1,085	0	1,734
3 heures	1,085	0	1,632
6 —	0,875	0	1,632
12 —	0,930	0	1,504
8 jours	1,085	0	0,000
1 mois	0,304	0	0,000

Comme on le voit, la combinaison du sulfate avec l'aluminate ne s'est produite qu'après un temps assez long, l'aluminate n'ayant pu s'hydrater que très lentement.

Dans les ciments Portland les mieux fabriqués il existe toujours un peu de chaux libre, et comme ils contiennent très peu d'alumine, cette chaux libre, en se dissolvant rapidement, empêche l'hydratation de l'aluminate ; le sulfate de chaux, entrant à son tour en dissolution, et ne pouvant pas se combiner à l'aluminate, ajoute son action à celle de la chaux pour annuler le rôle de l'aluminate ; comme c'est à ce sel qu'il faut attribuer la prise, quand elle se produit rapidement, on doit donc avoir une prise lente.

Si la chaux libre, par un séjour suffisamment prolongé à l'air,

se trouve carbonatée, au moment où le ciment se trouve au contact de l'eau, la dissolution de la chaux est peu abondante et rien ne met obstacle à la dissolution de l'aluminate ; la combinaison avec le sulfate de chaux peut se produire et le sulfoaluminate formé, ainsi que l'excès d'aluminate, en cristallisant, déterminent la prise rapide du ciment.

Les expériences suivantes feront voir que les choses doivent bien se passer ainsi :

1° Un ciment frais, additionné de sulfate de chaux, et prenant lentement à l'eau douce, prend rapidement si on le gâche avec une solution contenant une quantité de carbonate de soude suffisante pour neutraliser la chaux libre. Exemple :

1° Ciment additionné de 1 % de gypse, gâché à l'eau pure : prise, 8 heures ; même ciment gâché avec une solution de carbonate de soude à 2 grammes par litre : prise, 30 minutes.

2° Un ciment additionné de sulfate de chaux est abandonné à l'air, et il manifeste une prise rapide au bout de quelques jours. Si, à ce moment, on ajoute au ciment une petite quantité de chaux hydratée on obtient une prise très lente :

		Prise	
		Commencement	Fin
1	Ciment contenant 2 % de gypse.	20'	2h,30
	Même ciment auquel on a ajouté 2 % de chaux .	6h	10h
2	Ciment contenant 1 % de gypse.	10'	20'
	Même ciment auquel on a ajouté 2 % de chaux .	1h	8h

3° Un ciment additionné de 1 % de plâtre est resté pendant quelques jours à l'air ; il faisait prise en quelques minutes ; on a agité le ciment avec un poids égal d'eau et on a constaté les résultats suivants.

Temps après lequel on a prélevé un échantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur	
	CaO	SO^3,CaO
5 minutes.	1gr,672	0gr
20 minutes.	1, 824	0
3 heures	1, 872	0
6 heures	2, 432	0
24 heures	2, 118	0

A ce même ciment on a ajouté 3 °/₀ de chaux hydratée ; la prise s'est produite en 8 à 10 heures ; le ciment traité comme ci-dessus a donné les résultats suivants.

Temps après lequel on a prélevé un échantillon de la liqueur	Matières en dissolution pour 1 litre de liqueur	
	CaO	SO^3,CaO
5 minutes.	1gr,368	5gr,525
20 minutes.	1, 580	3, 196
3 heures	2, 128	1, 734
6 heures	2, 432	0, 290
24 heures	2, 128	0, 000

Les ciments alumineux, tels que les Vassy, renferment jusqu'à 6 et 7 °/₀ de sulfate de chaux ; ils n'éprouvent cependant aucune altération par suite de cette teneur élevée en sulfate ; on peut même leur en ajouter 5 à 7 °/₀ sans diminuer bien sensiblement leur résistance.

Un ciment contenant très peu d'alumine, comme certains ciments de grappiers, peut supporter sans inconvénient des doses de 8 à 10 °/₀ de sulfate de chaux ; tous ces faits s'expliquent encore par la formation du sulfoaluminate de chaux.

Les ciments alumineux sont généralement cuits à une température peu élevée et l'aluminate de chaux qu'ils contiennent en grande quantité s'hydrate rapidement au moment du gâchage. Le sulfate de chaux est donc neutralisé très vite et en se transformant, avant la prise, en sulfoaluminate, il ne peut plus avoir d'action nuisible par la suite. Si d'ailleurs, on dépasse une certaine dose de sulfate, 6 à 7 °/₀ par exemple, il suffit d'ajouter 1 à 2 °/₀ de sulfate en plus pour que le ciment ne prenne aucune cohésion ; mis dans l'eau il gonfle et se désagrège complètement. L'excès de sulfate a, en effet, empêché l'hydratation de l'aluminate et, d'un autre côté, il ne peut pas se dissoudre assez vite pour se combiner en totalité avec l'aluminate avant la prise ; la réaction se produit lentement et détermine le gonflement de la masse.

Avec le ciment Portland, l'addition de 2 à 3 °/₀ seulement de sulfate a pour effet de retarder considérablement l'hydratation de l'aluminate, quand le ciment est gâché à l'eau de mer surtout. L'aluminate ne commence à s'hydrater qu'au moment où le silicate de chaux a fait prise et quand le mortier a déjà acquis une assez grande dureté. La combinaison du sulfate de chaux avec l'aluminate se produit lentement, et bien que le sel formé soit en proportion relativement faible, il peut produire le gonflement du mortier par suite de la très grande quantité d'eau qu'il fixe en cristallisant.

Dans les ciments exclusivement siliceux, le sulfate de chaux n'a d'autre inconvénient que d'appauvrir le mortier en se dissolvant peu à peu, mais il ne peut pas produire de gonflement puisqu'il ne trouve pas d'alumine pour former du sulfoaluminate.

A l'appui de ce que nous venons d'avancer, nous rapporterons les expériences suivantes prises parmi un grand nombre d'essais du même genre.

On a mélangé à un ciment de Vassy 7 °/₀ de sulfate de chaux. Le mortier est resté immergé dans l'eau de mer pendant près d'une année et il n'a subi aucune altération. Le même ciment mélangé avec 10 °/₀ de sulfate et placé dans l'eau au bout de deux jours s'est décomposé instantanément.

Un ciment de grappiers contenant 1,5 °/₀ d'alumine a été additionné de 10 °/₀ de sulfate de chaux ; le mortier est conservé dans l'eau de mer et il reste absolument intact.

Le mélange de 80 parties de ciment de grappiers avec 20 parties de ciment de Vassy, additionné de 3 °/₀ de sulfate de chaux, s'est décomposé au bout de quelques jours d'immersion dans l'eau de mer. (Le ciment de grappiers abandonne beaucoup de chaux à l'eau de gâchage).

Le même ciment de Vassy, auquel on avait ajouté 10 °/₀ de chaux éteinte et 3 °/₀ de sulfate de chaux, s'est décomposé.

ANNEXE II

—

DÉCOMPOSITION DES CIMENTS PAR L'EAU

Quand une gangue hydraulique se trouve en contact avec une eau renouvelée fréquemment, elle est décomposée peu à peu et elle finirait par perdre toute cohésion si l'eau était absolument pure ; mais l'acide carbonique, que contiennent toutes les eaux naturelles, arrête la dissolution, et la production de carbonate de chaux peut être, dans certains cas, non seulement une cause de préservation, mais aussi un appoint pour la résistance.

On a déjà fait de nombreuses recherches sur la décomposition des mortiers par l'eau et on a reconnu qu'elle se produisait suivant certaines lois bien déterminées. Nous nous sommes proposé d'étudier l'allure de la décomposition de divers ciments et chaux traités par un grand excès d'eau.

Dans une première série d'expériences, nous avons agité le ciment en poudre avec 10 fois son poids d'eau distillée, puis, de temps en temps, on a prélevé la moitié du liquide clair qui a été remplacé par de l'eau distillée. Dans le liquide extrait on a dosé la chaux en dissolution par une liqueur tirée d'HCl.

Numéros des essais	Quantité de chaux en dissolution par litre de liqueur						
	Portland	Ciment de grappiers	Chaux hydraulique		Ciment prompt	Ciment de laitier	
			1	2		1	2
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
1	0,532	1,239	1,302	1,348	0,701	1,220	1,311
2	0,729	1,121	1,441	1,385	0,456	1,037	1,159
3	1,629	1,563	1,317	1,271	0,274	0,793	0,945
4	1,432	1,307	1,116	1,193	0,244	0,762	0,823
5	1,403	1,494	1,165	1,240	0,183	0,701	0,808
6	1,189	1,372	1,255	1,271	0,185	0,854	0,884
7	1,189	1,281	0,961	1,116	0,152	0,854	0,854
8	1,113	1,178	1,271	1,410	0,137	0,762	0,732
9	1,128	1,116	1,286	1,426	0,152	0,610	0,640
10	1,082	1,069	1,224	1,271	0,155	0,488	0,427
15	1,054	0,992	1,162	1,224	0,108	0,341	0,325
20	0,976	0,868	1,154	1,124	0,124	0,170	0,232
25	1,007	0,820	1,125	1,154	0,139	0,139	0,186
30	0,942	0,653			0,121	0,136	0,136
35	0,614				0,137		

Nous avons recommencé une nouvelle série d'essais en prenant seulement 5 grammes de ciment et 200 centimètres cubes d'eau distillée. A chaque essai, on prélevait 100 centimètres cubes qui étaient remplacés par de l'eau pure ; le contenu du flacon était agité fréquemment de manière à maintenir la poudre en suspension dans l'eau. L'intervalle entre chaque essai était de 24 heures au moins.

Voici les résultats obtenus sur 11 ciments et chaux de différentes provenances (Tableau page 338).

On reconnaît tout d'abord, en examinant ces résultats, que les ciments Portland, les ciments de grappiers et les chaux hydrauliques se distinguent bien nettement des ciments naturels à prise lente ou à prise prompte et des ciments de laitier ; la quantité de chaux enlevée par l'eau est beaucoup plus grande avec les premiers qu'avec les seconds. Il faut observer que les uns peuvent être considérés comme des produits siliceux et les autres comme des produits exclusivement alumineux.

Entre les ciments Portland et les chaux hydrauliques, il

Numéros des essais	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Portland	Portland	Chaux hydraulique	Chaux hydraulique	Ciment naturel lent	Ciment naturel demi-lent	Ciment prompt	Ciment prompt	Ciment mélangé lent	Ciment mélangé demi-lent	Ciment de laitier
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	kr.	gr.	gr.	gr.	gr.
1	0,288	0,372	1,246	1 246	0,651	0,391	1,286	0,304	0,212	0,456	1,054
2	0,304	0,465	1,200	1,185	0,496	0,304	0,930	0,273	0,258	0,562	0,961
3	0,364	0,589	1,276	1,154	0,403	0,334	0,589	0,304	0,307	0,547	0,713
4	0,653	0,896	0,922	1,064	0,307	0,243	0,395	0,197	0,228	0,395	0,486
5	0,942	1,170	1,140	1,155	0,486	0,380	0,130	0,212	0,182	0,395	0,365
6	1,064	1,276	1,140	1,185	0,258	0,288	0,212	0,136	0,182	0,304	0,288
7	1,398	1,368	1,124	1,170	0,212	0,212	0,167	0,152	0,182	0,228	0,212
8	1,018	1,018	1,155	1,109	0,182	0,182	0,136	0,121	0,152	0,197	0,221
9	1,124	0,967	0,972	1,079	0,152	0,136	0,167	0,121	0,136	0,167	0,152
10	0,942	0,744	0,927	1,033	0,136	0,136	0,152	0,106	0,136	0,152	0,136
15	0,577	0,532	0,304	0,456	0,121	0,091	0,106	0,076	0,091	0,136	0,045
20	0,273	0,319	0,136	0,242	0,076	0,076	0,060	0,076	0,091	0,136	0,015
25	0,167	0,197	0,091	0,152	0,091	0,076	0,076	0,076	»	»	traces
30	0,182	0,136	0,060	0,121	0,060	0,092	0,076	0,076	»	»	traces
(1)	1,542	1,633	1,554	1,815	0,510	0,433	0,635	0,350	»	»	0,514
(2)	30,80	32,6	31,0	36,2	10,2	8,7	12,6	7,0	»	»	10,3

(1) Quantité totale de chaux enlevée sur 5 grammes de ciment.
(2) Quantité de chaux enlevée pour 100 de ciment.

existe également une différence essentielle ; la quantité de chaux abandonnée par les Portland est d'abord faible puis elle augmente, devient assez élevée et diminue ensuite, comme cela se produit avec tous les autres ciments. Avec les chaux hydrauliques, la dissolution de la chaux est très grande dès le début ; elle conserve ensuite la même valeur pendant longtemps et tombe enfin brusquement à un chiffre peu élevé.

Les ciments prompts, quand ils ne contiennent pas de chaux libre, abandonnent peu de chaux. La présence de la chaux libre a été constatée dans le ciment O ; on n'en a pas trouvé dans le ciment H. Les ciments E et F, qui ne sont que des ciments prompts surcuits, présentent les mêmes caractères que ceux-ci. Les ciments I et J sont des produits obtenus par le mélange de ciment prompt avec des grappiers de chaux ; mais, comme c'est le ciment prompt qui domine, surtout dans le

ciment I, l'allure de la décomposition est aussi à peu près la même.

Ce sont les ciments de laitier qui, au bout de quelque temps, abandonnent le moins de chaux ; au début, il s'en dissout une quantité assez importante à cause de la grande proportion de chaux hydratée contenue dans ces ciments ; l'allure de la décomposition est la même que celle des ciments prompts (1).

On a examiné dans le liquide clair prélevé à chaque essai, non seulement la dissolution de la chaux, mais aussi celle de l'alumine et du sulfate de chaux. Avec les ciments Portland, on a constaté la présence de l'alumine dans les deux premières prises d'échantillons et le sulfate de chaux dans la première seulement. Quand la teneur en CaO n'était plus que de 0^{gr} 150 à 0^{gr} 200 par litre, le sulfate de chaux a reparu dans la solution ; à ce moment, en effet, le sulfoaluminate est décomposé par l'eau (Annexe I).

Avec les chaux et les ciments E, F et K la solution ne contenait pas d'alumine ; le sulfate de chaux se trouvait en plus ou moins grande quantité dans les premiers échantillons prélevés.

Avec le ciment H, on a constaté la présence de l'alumine en dissolution dans les trois premiers échantillons ; la présence du sulfate de chaux n'a été observée qu'à la sixième prise d'essais.

Le ciment G n'a pas abandonné de quantité appréciable d'alumine, le sulfate de chaux ne se trouvait que dans le premier échantillon et il a reparu au septième. Les ciments I et J se sont comportés respectivement à peu près comme les ciments H et G.

L'allure de la décomposition des ciments et des chaux par l'eau permet de se rendre compte de certains faits que l'on observe en pratique. Ainsi, quand un mortier de ciment ou de chaux est traversé par l'eau, il s'en échappe une laitance qui se

(1) L'observation suivante permet encore de séparer les chaux, les ciments de grappiers et de Portland des ciments prompts et des ciments de laitiers ; si on agite une certaine quantité de ciment en poudre dans un excès d'eau, le tout étant contenu dans un flacon fermé, et que l'eau ne soit pas renouvelée, on remarque bientôt que les parois se tapissent de cristaux d'hydrate de chaux, quand il s'agit des produits de la première catégorie ; mais les cristaux d'hydrate de chaux n'apparaissent jamais avec les ciments prompts ou les ciments de laitier.

dépose peu à peu et forme des sortes de stalactites qui sont bien connues. Cela ne se produit pas ou très peu avec les ciments prompts et les ciments de laitier. Il en résulte également que les mortiers de ciment Portland ou de chaux se colmatent rapidement, tandis que les ciments qui abandonnent peu de chaux restent beaucoup plus longtemps perméables.

Quand le mortier est très poreux et qu'il est traversé par de grandes quantités d'eau, le Portland résiste bien parce que la quantité de chaux qu'il abandonne, en se transformant en carbonate, arrête promptement l'attaque par l'eau. Avec les ciments qui ne laissent dissoudre que peu de chaux, l'attaque par l'eau est plus lente, mais elle persiste beaucoup plus longtemps et le mortier s'appauvrit continuellement. Aussi les ciments alumineux ne peuvent-ils supporter de grandes quantités de sable tandis qu'avec les Portland on peut en mélanger jusqu'à 10 parties pour une de ciment.

Nous avons cherché également à voir si la décomposition par l'eau des ciments Portland était différente selon le degré de cuisson auquel ils ont été portés. Nous avons choisi sur deux ciments, de provenance différente, des roches noires, de cuisson normale, des roches grises n'ayant pas atteint la vitrification et enfin des incuits jaunes dans lesquels l'acide carbonique avait été simplement expulsé. Tous ces échantillons pulvérisés finement de manière à passer complètement au tamis de 5 000 mailles par centimètre carré, ont été traités comme précédemment ; c'est-à-dire qu'on a agité 5 grammes de poudre dans 200 centimètres cubes d'eau distillée et qu'on a prélevé à chaque essai 100 centimètres cubes.

La seule différence que l'on constate entre les roches noires et les roches grises est la dissolution de la chaux un peu plus importante dès le début, mais par la suite l'allure de la décomposition est sensiblement la même ; cela semblerait indiquer que dans la roche grise les combinaisons entre les divers éléments sont à peu près les mêmes que dans la roche noire ; celle-ci contiendrait peut-être un peu moins d'aluminate. L'incuit jaune se comporte comme un ciment prompt contenant beaucoup de chaux libre.

On a obtenu les résultats ci-après :

Numéros des essais	Quantité de chaux en dissolution, en grammes par litre					
	Ciment n° 1			Ciment n° 2		
	Roches noires	Roches grises	Incuit jaune	Roches noires	Roches grises	Incuit jaune
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
1	0,288	0,305	0,699	0,372	0,465	1,193
2	0,304	0,653	1,368	0,465	0,465	1,209
3	0,364	0,608	1,094	0,589	0,666	1,162
4	0,653	0,714	0,926	0,896	1,050	0,899
5	0,942	1,079	0,729	1,170	1,110	0,837
6	1,064	1,337	0,608	1,276	1,302	0,713
7	1,398	1,398	0,577	1,368	1,033	0,547
8	1,018	1,088	0,425	1,018	0,820	0,424
9	1,124	0,978	0,395	0,967	0,775	0,307
10	0,942	0,775	0,364	0,744	0,668	0,258
15	0,577	0,334	0,121	0,532	0,425	0,152
20	0,273	0,258	0,121	0,319	0,228	0,197
25	0,167	0,212	0,121	0,197	0,182	0,121
30	0,182	0,182	0,106	0,136	0,121	0,121
(1)	1,542	1,559	0,974	1,633	1,436	1,087
(2)	30,8	31,2	19,5	32,7	28,7	21,7

(1) Quantité totale de chaux enlevée sur 5 grammes de ciment.
(2) Quantité de chaux enlevée pour 100 de ciment.

Les ciments B, C, D, E, H, K et les échantillons de roches grises et d'incuits jaunes du ciment n° 2 du tableau ci-dessus avaient été analysés avant d'être mis en expérience ; après le dernier essai ils ont été analysés de nouveau.

Ces essais n'ont pas été continués assez longtemps pour que la décomposition puisse être considérée comme terminée ; sauf peut-être en ce qui concerne le ciment de laitier, les autres ciments abandonneraient certainement pendant longtemps encore des quantités appréciables de chaux.

En dehors de la perte en chaux on constate une perte assez faible de silice et d'alumine. Les ciments prompts abandonnent certainement un peu d'alumine à l'eau de lavage. Quant à la silice,

nous ne pourrions pas encore affirmer qu'elle entre un peu en dissolution ; quelques expériences, encore trop peu nombreuses pour être relatées, sembleraient cependant l'indiquer.

Les résultats de ces analyses ont été les suivants :

	B			C	D	E	H	K
	Roche noire	Roche grise	Incuit jaune	Chaux hydraulique	Chaux hydraulique	Ciment naturel lent	Ciment prompt	Ciment de laitier
	1° *Analyse avant l'expérience*							
Silice	22,25	22,10	21,75	21,55	16,20	21,80	21,80	27,45
Alumine	7,55	7,15	7,00	1,19	4,51	8,32	10,03	14,65
Oxyde de fer . . .	2,35	2,40	2,50	0,91	2,09	4,08	3,77	1,75
Chaux	65,87	65,95	66,10	65,00	59,86	54,10	55,00	46,20
Magnésie	0,78	0,85	0,70	1,42	0,54	3,06	2,80	1,86
Acide sulfurique . .	0,42	0,48	0,50	0,67	0,77	3,70	2,74	0,72
Perte au feu . . .	0,48	0,75	1,10	9,00	16,00	5,10	3,75	7,00
Non dosé et pertes .	0,30	0,32	0,35	0,26	0,03	»	0,11	0,37
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,16	100,00	100,00
	2° *Analyse après l'expérience*							
Silice	22,10	22,60	21,00	21,05	15,26	20,70	19,40	27,10
Alumine	6,85	6,90	6,85	1,06	4,47	7,93	8,27	13,70
Oxyde de fer . . .	2,30	2,30	2,45	0,74	1,78	3,97	3,53	1,60
Chaux	30,20	35,50	41,10	32,50	25,20	44,40	47,10	34,90
Magnésie	0,80	0,80	0,70	0,45	0,55	3,52	2,70	2,10
Acide sulfurique . .	0,37	0,30	0,17	0,50	0,55	1,88	2,30	0,54
Perte	37,38	31,60	27,73	43,70	52,19	17,60	16,70	20,06
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Équivalents de chaux pour un équivalent de silice . .	1,45	1,73	2,10	1,66	1,77	2,31	2,61	1,38
Quantité de chaux enlevée d'après l'analyse . .	35,67	30,45	25,00	32,50	34,66	9,70	7,90	11,30
Quantité de chaux enlevée d'après l'expérience	32,70	28,70	21,70	31,00	36,20	10,20	7,00	10,30

ANNEXE III

—

QUANTITÉ D'EAU FIXÉE PAR LES CHAUX ET LES CIMENTS

La prise et le durcissement des mortiers hydrauliques étant dûs à la formation de sels hydratés, on peut présumer qu'il existe une relation entre le degré de dureté d'un mortier et la quantité d'eau combinée qu'il renferme.

Nous avons examiné, sur une grande quantité de briquettes depuis plus ou moins longtemps dans l'eau ou à l'air, quelle était la proportion d'eau qui avait été fixée.

Nous avons supposé que les sels hydratés contenus dans le mortier n'abandonnaient pas d'eau au-dessous de 100° ; le mortier a été desséché à 90-100° et la perte de poids était considérée comme représentant l'humidité du mortier ; porté ensuite à la température du rouge vif, le ciment perdait son eau de combinaison et l'acide carbonique qu'il contenait. Ce dernier ayant été dosé préalablement, en retranchant la perte à 100° ajoutée à la teneur en CO^2, de la perte totale, on avait l'eau combinée.

Dans nos premiers essais, nous prenions la briquette entière ; par la suite nous avons prélevé un échantillon du mortier au centre de la briquette pour éviter autant que possible l'influence de l'acide carbonique.

Voici quelques-uns des résultats obtenus :

	Eau à 100°	Eau combinée	Co^2	Perte au feu totale	Observations	
Ciment Portland						
Après 7 jours. . . .	12,00	6,35	1,50	19,85	Ciment pur conservé dans l'eau	
	13,90	8,42	2,15	24,17		
	14,35	8,29	2,05	24,69		
28 jours. . . .	12,35	8,68	2,10	23,13		
	11,40	8,12	2,60	22,12		
	11,40	9,08	2,50	22,98		
3 mois	11,32	9,78	2,10	23,20		
	12,70	8,14	3,26	24,10		
1 an.	11,93	10.36	2,76	25,04		
	9,66	10,10	3,39	23,15		
4 ans	9,80	12,36	1,90	24.06		
5 ans	9,30	11,80	1,30	22,40		
	9,90	14.40	1,90	26,20		
	8,65	13,29	0,80	22,74		
2 ans	4,62	9,11	5,65	19,38	Ciment pur conservé à l'air.	
3 ans	4,95	8,61	8,35	21,91		
	5,80	8,52	8,50	23,82		
5 ans	5,20	9,05	3,20	17,45		
15 ans	10,45	11,40	2,80	24,65		
28 jours. . . .	6,48	2,57	1,85	10,90	sur le mortier	Mortier 1 de ciment 3 de sable normal conservé dans l'eau
	25,92	10,28	7,40	43.60	sur le ciment (1)	
2 ans	8,22	4,61	2,05	14,88	mortier	
	32,88	18,44	8,20	59,52	ciment	
3 ans	7,65	5,73	1,85	15,23	mortier	
	30,60	22,92	7,40	60.92	ciment	
3 ans	10,02	4,75	1,65	16,42	mortier	
	40,08	19,00	6,60	65,68	ciment	
2 ans	7,25	3,50	2,00	12,75	mortier	
	29,00	14,00	8,00	51,00	ciment	
4 ans	4,85	4,88	2,95	12,68	mortier	
	19,40	19,52	11,80	50,72	ciment	
2 ans	1,50	0,90	5,60	8,00	mortier	Mortier 1 : 3 conservé à l'air
	6,00	3,60	22,40	32,00	ciment	
2 ans	1,65	1,90	4,90	8,45	mortier	
	6,60	7,60	19,60	33,80	ciment	
3 ans	2,32	3,72	4,90	10,94	mortier	
	9,28	14,88	19,60	43,72	ciment	
3 ans	2,38	3,46	5,90	11,74	mortier	
	9,52	13,84	23,60	46,96	ciment	
Ciment à prise rapide						
Après 2 jours. . . .	25.50	6,65	2,95	35,10	Ciment pur conservé dans l'eau	
8 jours. . . .	25,50	7,40	2,60	35,50		
5 ans	29,00	8,90	3,30	41,20		
Ciment de grappiers						
Après 1 an.	18,30	8,20	3.30	29,80	Ciment pur conservé dans l'eau	
2 ans	15,50	11,50	3,20	30,20		

(1) Le mortier contenant exactement 25 °/₀ de ciment, nous avons donné, en même temps que les résultats constatés sur le mortier, les chiffres rapportés à 100 de ciment.

	Eau à 100°	Eau combinée	CO^2	Perte au feu totale	Observations	
Chaux hydraulique						
Après 2 ans . . .	20,10	11,60	2,20	33,90	Chaux pure conservée dans l'eau.	
— 2 ans . . .	25,25	10,55	2,70	38,50		
— 2 ans . . .	21,85	7,80	2,60	32,25		
— 4 ans . . .	24,60	10,10	2,80	37,50		
— 4 ans . . .	5,75	2,30	2,50	10,55	°/₀ de mortier	Mortier : 1 de chaux 3 de sable normal, conservé dans l'eau.
	23,00	9,20	10,00	42,20	°/₀ de chaux	
— 2 ans . . .	7,85	2,05	2,50	12,40	°/₀ de mortier	
	31,40	8,20	10,00	49,60	°/₀ de chaux	
Ciment de laitier						
Après 4 mois . . .	15,70	5,2	3,8	23,70	Ciment pur conservé dans l'eau.	
— 2 ans . . .	19,50	6,0	2,7	28,20		
— 4 ans . . .	12,60	6,2	4,8	23,60		

D'après ces expériences, on voit que c'est le ciment Portland qui présente, avec la perte au feu la moins élevée, la plus grande proportion d'eau combinée. Avec les autres produits hydrauliques, la quantité d'eau qui disparaît à 100° est très importante.

Le ciment à prise rapide contient à peu près autant d'eau combinée au bout de quelques jours qu'après plusieurs années.

C'est le ciment de laitier qui contient le moins d'eau combinée et celle-ci ne paraît pas non plus augmenter beaucoup avec le temps. On constate, en effet, que les résistances de ces ciments sont peu différentes après plusieurs années de ce qu'elles étaient au bout de quelques semaines.

Il est possible que certains sels existant dans les mortiers puissent perdre leur eau de combinaison au-dessous de 100°. Le sulfoaluminate de chaux, dont nous avons parlé précédemment, est dans ce cas ; il existe en proportion relativement importante dans les ciments prompts. Peut-être faut-il attribuer à la présence de ce sel les résultats défectueux que donnent les mortiers de ciments prompts à l'air sec.

L'aluminate de chaux hydraté ne paraît pas abandonner beaucoup d'eau au-dessous de 100°. Nous avons constaté les résultats suivants avec de l'aluminate de chaux hydraté :

Perte à 60°		0
—	80	0
—	95	0
—	100	1,2
—	115	1,2
—	140	1,2
—	150	2,2
—	160	3,5
—	250	8,5
—	310	13,0
—	360	20,0
—	420	20,0
—	au rouge sombre	20,0
—	au rouge vif	22,0
—	—	28,5
—	—	29,5

Les principaux sels qui peuvent exister dans les mortiers de ciment et de chaux sont : l'aluminate de chaux, le silicate de chaux, l'hydrate de chaux et le carbonate de chaux. Chaque sel doit être deshydraté à des températures différentes ; nous avons cherché à voir si, en soumettant un mortier à une température de plus en plus élevée, on observait des moments d'arrêt dans la deshydratation. Nous avons fait ces expériences sur 7 échantillons de ciments et de chaux.

Ciment de grappiers		Chaux hydraulique		Ciment de laitier	
température	perte	température	perte	température	perte
100°	15,5	80°	24,60	90°	17,5
140	18,5	100	24,60	100	19,5
180	18,0	200	26,20	140	19,5
250	19,0	280	27,30	150	20,0
320	19,5	300	27,50	300	22,0
390	20,0	350	27,50	380	23,0
420	20,5	410	28.20	410	23.5
450	20,5	450	28,20	450	23,5
rouge sombre	23,2	rouge sombre	36,40	rouge sombre	23,5
rouge	29,0	rouge	37,10	rouge	25,0
rouge vif	29,5	rouge vif	37,50	rouge vif	28,2
»	30,5	»	»	»	»

Ciment Portland				Ciment à prise rapide			
N° 1		N° 2		N° 2		N° 1	
température	perte	température	perte	température	perte	température	perte
70°	7,40	90°	9,90	70°	23,90	60°	27,5
80	7,55	100	9,90	80	23,90	80	27,5
100	8,40	110	10,20	100	25,50	95	28,5
110	8,40	130	11,90	120	25,50	100	29,0
130	9,90	140	13,50	200	28,40	125	29,2
160	10,15	145	13,60	220	28,40	140	30,2
200	12,75	180	13,60	260	28,90	150	30,8
270	12,75	200	14,00	320	29,80	160	32,2
300	13,25	250	15,80	390	30,10	200	32,2
350	13,60	280	16,80	450	30,00	260	32,0
450	13,75	320	18,00	rouge sombre	30,50	320	32,5
rouge sombre	17,25	380	18,50	rouge	34,60	380	33,0
rouge	20,25	420	18,00	rouge vif	35,10	440	33,5
rouge vif	21,90	430	18,00	»	»	450	33,5
»	»	450	18,00	»	»	rouge sombre	38,5
»	»	rouge sombre	19,80	»	»	rouge vif	41,2
»	»	rouge	25,00	»	»	»	»
»	»	rouge vif	26,20	»	»	»	»

Ciment de grappiers : 2 ans dans l'eau
Chaux hydraulique : 4 ans dans l'eau
Ciment de laitier : 2 ans dans l'eau
Ciment Portland n° 1 : 5 ans dans l'eau — ciment moulu grossièrement.
— n° 2 : — d° — ciment moulu finement.
Ciment prompt n° 1 : 2 jours dans l'eau
— n° 2 : 5 ans dans l'eau

Ces essais ne sont pas évidemment suffisamment rigoureux pour pouvoir donner des renseignements absolument concluants. On peut observer cependant que pour le ciment, la chaux et le ciment de grappiers il y a un moment d'arrêt dans la deshydration assez nettement marqué entre 300 et 450° et pour les ciments prompts entre 160 et 450°.

Si on fait abstraction de l'acide carbonique, on trouve que, à 450°, les échantillons essayés ne renfermaient plus que la quantité d'eau suivante :

Portland. 1	Portland. 2	Ciment prompt. 1	Ciment prompt. 2
6,85	6,30	2,15	4,40

Ciment de laitier	Ciment de grappiers	Chaux hydraulique
2,0	6,80	6,50.

L'aluminate de chaux étant de tous les sels que contiennent les mortiers celui qui s'hydrate le plus rapidement, on doit en conclure que plus un ciment en renferme, plus la quantité d'eau fixée doit être grande dès le début. Ce fait se vérifie déjà avec les ciments prompts. Nous avons examiné également ce qui se passe à cet égard avec des ciments Portland très cuits ou imparfaitement cuits.

Voici les résultats obtenus sur deux échantillons ; le premier était composé de roches noires très cuites ; le second provenait de la mouture de roches grises légères.

Époque à laquelle l'essai a été fait	Ciment de roches noires					Ciment de roches grises				
	Eau à 100°	Eau combinée	CO^2	Perte au feu totale	Résistance par cm2	Eau à 100°	Eau combinée	CO^2	Perte au feu totale	Résistance par cm2
					kg.					kg.
Au moment de la prise.	18,90	1,00	0,35	20,25	»	18,60	3,24	0,70	22,54	»
Après 24 heures . . .	17,25	3,31	0,50	21,06	»	15,90	6,61	0,70	23,26	14,0
— 2 jours . . .	15,75	5,24	0,55	21,54	16,5	15,10	7,78	0,80	23,68	25,0
— 3 jours . . .	15,35	5,83	0,60	21,78	»	14,90	7,84	1,20	23,94	29,5
— 4 jours . . .	14,40	5,87	0,75	22,02	»	14,00	8,16	1,50	23,66	27.5
— 5 jours . . .	14,35	6,18	0,75	21,28	»	13,80	8,52	1,10	23,42	33,5
— 7 jours . , .	14,30	6,77	0,75	21,82	35,8	13,50	8,82	1,00	23,32	33,0
— 15 jours . . .	11,95	9,65	1,05	22,60	»	12,50	10,77	0,75	23,02	41,0
— 30 jours . . .	11,40	10,02	1,10	22,52	47,0	12,25	10,31	1,20	23,76	39,8

ANNEXE IV

—

INFLUENCE DU DEGRÉ D'HUMIDITÉ DU SABLE SUR LA PRISE ET LE DURCISSEMENT DES MORTIERS

On se préoccupe rarement sur les chantiers du degré d'humidité du sable que l'on emploie pour la confection du mortier ; cet élément peut avoir cependant une influence assez sensible et il n'était pas inutile de rechercher quelle importance il faut y attacher.

Pour examiner ce qui se passe quand le ciment est mélangé avec du sable humide, en ce qui concerne la prise du mortier, nous avons dirigé nos expériences de la façon suivante : On a pris un sable bien calibré, assez gros et parfaitement lavé et tamisé. Ce sable a été humecté avec une proportion d'eau déterminée, puis on l'a mélangé avec du ciment dans la proportion de une partie de sable pour une de ciment, en poids. Après un certain temps, le tout a été jeté sur un tamis assez gros pour laisser passer tout le ciment et assez fin pour retenir tout le sable. On a pu de cette façon examiner le ciment et déterminer soit la prise, soit la quantité d'eau fixée.

Voici quelques essais exécutés de cette façon :

Désignation du ciment	Temps pendant lequel le ciment est resté en contact avec le sable	Prise à l'eau douce		Observations
		Début	Fin	
		h. m.	h. m.	
1° Ciment prenant en 6 m. . . Sable contenant 3 % d'eau . .	10 minutes	3,30	6	
	1 heure	6	9	
	2 heures	7	10	
	3 heures	7,30	11	
	4 heures	9	15	
2° Ciment prenant en 12 m . . Sable contenant 3 % d'eau . .	10 minutes	3,30	6,30	
	1 heure	5	8	
	2 heures	4,30	7,30	
	3 heures	3,50	7	
	4 heures	4,45	8	
3° Ciment prenant en 2 h . . .	10 minutes	4	7,25	sable 3 % d'eau
4° — 20 m . .	10 minutes	4,10	6,40	sable 3 % d'eau
5° — 5 h . . .	10 minutes	3,45	5,45	sable 3 % d'eau
6° — 12 m . .				
Sable contenant 1 % d'eau . .	1 heure	4	6,30	
— 2 — . .	1 heure	4,10	6,50	
— 4 — . .	1 heure	4,30	7,40	
— 6 — . .	1 heure	4 10	8,30	

Comme on le verra par les résultats du tableau suivant, page 351, l'eau contenue dans le sable se porte immédiatement sur le ciment, mais la quantité d'eau qui est fixée par celui-ci ne paraît pas dépasser beaucoup 1 % ; la prise est également à peu près la même, que le sable soit plus ou moins mouillé. Nous montrerons plus loin que le durcissement du mortier ne diffère pas sensiblement quand le mélange est fait avec du sable humide ou avec du sable sec ; à condition, bien entendu, que la quantité d'eau contenue dans le sable ne soit pas exagérée.

La prise seule est donc modifiée ; on est conduit à admettre, par conséquent, que l'eau contenue dans le sable a été fixée par l'aluminate de chaux, que l'action de celui-ci a été ainsi annulée, et que c'est ce sel seul qui détermine la prise quand elle se produit rapidement.

On a cherché, sur quelques échantillons, la quantité d'eau fixée après un certain temps de contact avec le sable humide.

Désignation du ciment	Eau à 100°	Eau combinée	CO^2	Perte au feu
1° Ciment prenant en 8 minutes	»	0,45	0,75	1,20
en contact avec du sable contenant 3 % d'eau :				
pendant 10 minutes	1,85	1,39	0,70	3,94
1 heure.	1,55	1,61	0,70	3,86
2 heures	1,75	1,35	0,70	3,80
3 heures	1,55	1,33	0,70	3,58
4 heures	1,65	1,39	0,70	3,74
2° Ciment prenant en 6 minutes	0,22	0,20	0,60	1,02
en contact avec du sable contenant 3 % d'eau :				
pendant 10 minutes	1,65	0,39	0,60	2,64
1 heure.	1,50	0,56	0,60	2,66
2 heures	1,60	0,56	0.65	2,76
3 heures	1,15	0,70	0,65	2.50
4 heures	1,30	0,65	0,75	2,70
3° Ciment prenant en 12 minutes, en contact pendant 1 heure avec du sable contant 1 % d'eau.	1,01	0,31	0,70	1,61
2 —	1,10	0,44	0,70	2,24
4 —	1,75	0,61	0,70	3,06
6 —	3,45	1,05	0,70	5,30

Quand un ciment Portland de composition et de cuisson normales, et prenant assez vite, est gâché en pâte pure, l'aluminate est également hydraté, mais la quantité d'eau est suffisante pour qu'il puisse cristalliser et déterminer un commencement de solidification de la masse ; la dureté d'un ciment qui a fait prise dans ces conditions n'est jamais appréciable qu'au bout de plusieurs heures. Si on mélange le même ciment avec du sable humide, on ne constate pas évidemment de solidification parce que la quantité d'eau est très faible, que la masse est très divisée et que l'aluminate s'hydrate sans pouvoir former une dissolution sursaturée.

L'aluminate une fois hydraté devient inerte et le ciment prend comme le ferait un ciment exclusivement siliceux, c'est-à-dire très lentement, c'est le silicate de chaux seul qui détermine la prise et le durcissement.

En définitive, l'emploi de sable humide ne paraît pas avoir d'inconvénient quand une prise rapide n'est pas nécessaire ; dans bien des cas le ralentissement de prise qu'il procure peut même être mis à profit.

Ce fait se produit certainement assez souvent sur les chantiers, et sans que l'on s'en rende compte, car il n'est pas rare qu'avec des ciments qui, en pâte pure, prennent en 10 à 12 minutes, on confectionne des mortiers dont la prise ne se manifeste qu'après plusieurs heures.

On peut également expliquer ainsi les différences de prise souvent considérables qui se produisent avec un mortier confectionné en apparence de la même manière.

Les expériences suivantes permettent de reconnaître les conséquences que peut avoir l'emploi du sable humide en ce qui concerne la résistance.

1re *Série d'essais.* — Dans la première série d'essais, les mortiers, au dosage de 1 de ciment pour 3 de sable, ont été comprimés fortement dans les moules. Le sable contenait 3 % d'eau. Quand on a fait des mélanges avec le sable humide, on a ajouté pour le gâchage une quantité d'eau moindre, de manière à obtenir en totalité la même quantité d'eau qu'avec le sable sec.

Le gâchage du mortier a été fait, tantôt immédiatement après le mélange avec le sable humide, tantôt une heure après. Les résultats font voir que la résistance n'a été nullement diminuée par l'emploi du sable humide.

2e *Série.* — Les essais de la deuxième série comprennent des mortiers aux dosages de 1 de ciment pour 1 de sable, 1 de ciment pour 3 de sable et 1 de ciment pour 5 de sable. Les mortiers ont été gâchés à la consistance ordinaire du mortier à maçonner. Pour se rapprocher de ce qui se passe en pratique, le ciment et le sable humide sont restés mélangés pendant dix minutes seulement avant le gâchage. Les mortiers ont été éprouvés à la traction et à la compression. Les résistances ont été à peu près les mêmes ; on remarque seulement que l'emploi du sable humide paraît plutôt préférable pour les mortiers maigres.

L'emploi de sable très humide restant en contact trop prolongé avec le ciment donnerait évidemment des résultats moins satisfaisants. Mais ce cas se présente assez rarement en pratique et on peut admettre qu'il est indifférent, au point de vue de la résistance, d'employer du sable sec ou humide.

Si l'on a besoin d'une prise assez rapide, il est bon de se mettre en garde contre l'emploi du sable humide ; si l'on ne peut pas obtenir qu'il soit tout à fait sec, on devra le mélanger rapidement avec le ciment, par petites quantités, et gâcher aussitôt.

Première série d'essais. — Mortiers : 1 : 3. — Comprimés.

Numéros d'ordre des échantillons	Mode de confection du mortier	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré à la traction					
				7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	3 ans
				k.	k.	k.	k.	k.	k.
1	Sable sec	11	2,11	11,5	18,5	21,9	»	29,5	33,4
1	Sable humide — Gâchage effectué aussitôt après le mélange	11	2,10	14 8	18,1	23,5	»	29,6	38,6
1	Sable humide — Gâchage effectué 1 heure après le mélange	11	2,06	16,8	19.3	22,2	»	29,7	36,2
2	Sable sec	11	2,07	12,4	16,5	22,5	»	28,0	35,0
2	Sable humide : gâchage immédiat	11	2,07	12.0	17,0	21,1	»	27,6	33.2
3	Sable sec	10,5	2,08	11,5	17,4	22,1	23.2	25,8	30,3
3	Sable humide — Gâchage immédiat	10.5	2,08	10,7	18,3	26,7	26,8	27,4	35,3
3	Sable humide — Gâchage 1 h. après le mélange	10,5	2,12	14,9	22,7	29,4	28.5	30,0	32,8
4	Sable sec	10,5	2,12	13,0	18,3	25,5	28,8	25,7	34,8
4	Sable humide — Gâchage immédiat	11	2.09	11,0	15,5	21,0	26,3	26,8	35,7
4	Sable humide — Gâchage 1 h. après le mélange	11	2,10	11,5	15,5	23,2	24,5	24,8	32,0
5	Sable sec	10,5	2.07	9,0	15,3	19,1	19,5	20,0	22,5
5	Sable humide — Gâchage immédiat	11	2,07	7.8	12,6	20,1	20,5	21,2	22,3
5	Sable humide — Gâchage 1 h. après le mélange	11	2,07	10,6	16,5	19,4	22,2	21,3	21,2
6	Sable sec	10,5	2,15	19,5	26,0	35,5	34,8	42,0	43,2
6	Sable humide : gâchage 1 h. après le mélange	11,5	2,13	20,4	25,9	35,1	29,7	38,5	44,5

Mais, dans la plupart des cas, il est avantageux de se servir de sable un peu humide, puisque celui-ci procure un ralentissement de prise assez important sans que les autres qualités du mortier soient en rien diminuées.

Deuxième série d'essais. — Mortiers à différents dosages. — Non comprimés :

Numéros d'ordre des échantillons	Mode de confection du mortier	Composition du mortier	Quantité d'eau de gâchage	Prise du mortier	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré — à la traction — 7 jours	à la traction — 28 jours	à la traction — 3 mois	à la traction — 1 an	à la compression — 7 jours	à la compression — 28 jours	à la compression — 3 mois	à la compression — 1 an
				h.		k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.
1	Sable sec	1 : 1	13	0,10	2,27	22,1	27,5	34,3	50,6	178,3	246,7	320,0	390,0
		1 : 3	12	0,20	2,07	9,0	13,7	20,4	27,2	65,0	100,0	136,7	166,7
		1 : 5	10	2,00	1,92	3,9	6,6	8,8	14,2	25,7	38,7	53,3	71,7
	Sable humide	1 : 1	15	4,00	2,21	16,4	26,5	33,1	47,0	135,0	193,3	290,0	356,7
		1 : 3	12,7	5,00	2,04	10,4	12,5	18,6	26,0	51,7	75,0	101,7	131,7
		1 : 5	12	6,00	1,87	4,0	6,6	8,8	12,9	18,7	30,3	48,3	58,5
2	Sable sec	1 : 1	13,5	0,10	2,28	26,7	40,7	44,0	56,7	213,3	323,3	373,3	443,3
		1 : 3	12	0,10	2,09	12,2	20,7	24,7	31,1	85,0	131,7	148,3	206,7
		1 : 5	11	0,15	1,88	5,0	8,1	10,1	13,5	38,7	55,0	65,0	85,0
	Sable humide	1 : 1	15	4,00	2,12	22,0	39,0	45,2	51,6	183,3	327,0	396,7	460,0
		1 : 3	12,7	4,00	2,04	11,7	20,0	20,0	26,2	68,3	105,0	138,3	180,0
		1 : 5	12	6,00	1,80	6,9	13,1	14,2	17,1	37,0	60,0	75,0	85,0
3	Sable sec	1 : 1	13,5	4,00	2,20	24,7	32,6	42,7	46,5	145,0	213,3	316,7	430,0
		1 : 3	12,5	6,00	2,00	7,4	10,2	15,6	22,6	40,3	65,0	101,7	121,7
		1 : 5	11,5	8,00	1,88	4,0	6,1	9,2	11,7	15,3	32,0	37,0	55,0
	Sable humide	1 : 1	15	7,00	2,19	20,0	32,2	38,4	41,2	123,0	200,0	256,7	383,3
		1 : 3	13	7,00	1,90	9,7	13,4	19,4	25,7	39,0	68,3	91,7	128,3
		1 : 5	12,5	8,00	1,84	4,4	6,9	10,1	11,2	18,7	33,7	40,0	56,7
4	Sable sec	1 : 1	13,2	2,00	2,23	34,2	44,2	49,4	50,7	260,0	383,3	410,0	566,7
		1 : 3	11,5	3,00	2,06	16,1	22,5	29,6	32,5	105,0	146,7	176,7	221,7
		1 : 5	11,0	4,00	1,87	8,7	9,9	12,6	16,0	58,3	68,3	88,3	118,3
	Sable humide	1 : 1	13,7	3,00	2,23	33,6	43,0	50,7	59,1	260,0	363,0	450,0	506,7
		1 : 3	11.5	3,30	2,04	17,9	22,7	29,2	33,0	105,0	150,0	170,0	218,3
		1 : 5	11,0	4,00	1,87	9,4	11,7	16,1	17,7	55,0	68,3	88,3	108,3

ANNEXE V

—

INFLUENCE
DU REBATTAGE SUR LA QUALITÉ DES MORTIERS

L'influence du rebattage sur la qualité des mortiers est souvent discutée, et il nous a paru intéressant de rechercher dans quelle mesure le mortier se trouve altéré quand on le regâche après qu'il a fait prise. M. l'Ingénieur en chef Alexandre a étudié cette question depuis plusieurs années, au point de vue spécial des mortiers conservés dans l'eau de mer. Ses expériences l'ont amené à formuler les conclusions suivantes :

« L'addition d'une certaine quantité d'eau pour ramener le « mortier rebattu à la consistance normale augmente la résis- « tance finale ; il y a un très sérieux danger à rebattre *sans addi-* « *tion d'eau*, car on constitue dans ce cas un mortier sec, poreux, « qui résiste moins bien aux attaques de la mer.

« En somme, le rebattage des mortiers, *avec addition d'eau*, n'a « pas à beaucoup près les inconvénients qu'on est tenté de lui at- « tribuer tout d'abord, et il y a lieu de s'en féliciter, car les maçons « pratiquent cette opération couramment sur les chantiers privés « et même sur les chantiers de travaux publics dès que la sur- « veillance cesse d'être vigilante. »

Nos expériences, faites sur des mortiers conservés dans l'eau douce, dans l'eau de mer et à l'air, confirment ces conclusions en ce qui concerne la résistance à la traction et à la compression.

Première série. — Dans une première série d'essais exécutés avec des ciments de diverses provenances, les mortiers au do-

sage de 1 de ciment pour 3 de sable normal ont été comprimés fortement dans les moules. Les briquettes sont restées immergées dans l'eau douce. On a considéré que le mortier avait fait prise quand il résistait à une forte pression du doigt et il était regâché avec addition d'une petite quantité d'eau, de manière a obtenir la même consistance que pour le gâchage normal. Le temps écoulé entre le moment où le mortier avait fait prise et celui où il a été regâché a varié entre une heure et vingt-quatre heures.

Les résultats constatés avec tous ces mortiers diffèrent très peu les uns des autres, même quand il s'agit des mortiers qui ont été regâchés 24 heures après la prise. Le rebattage n'a donc altéré en rien la résistance.

Deuxième série. — Dans la deuxième série d'essais les briquettes de mortier 1 : 3 ont été conservées dans l'eau et à l'air; les mortiers ont été comprimés et le regâchage fait dans les mêmes conditions que pour la première série.

Les résultats confirment les essais précédents, les briquettes à l'air donnent également des résistances aussi fortes quand le mortier a été regâché.

Troisième série. — Les briquettes de la troisième série ont été conservées dans l'eau de mer. Les mortiers regâchés sont, cette fois, un peu moins résistants que les mortiers gâchés normalement.

Quatrième série. — Les mortiers de la quatrième série ont été essayés à la compression ; les éprouvettes étaient conservées dans l'eau douce. Les résistances sont un peu moins élevées pour les mortiers regâchés.

Cinquième série. — Tous les essais précédents ayant été exécutés avec des mortiers composés de 1 de ciment pour 3 de sable nous avons examiné l'influence du rebattage sur des mélanges plus ou moins riches en sable. On a confectionné des mortiers composés d'une partie de ciment pour une, deux, trois et jusqu'à

cinq parties de sable normal, en poids. Dans un premier groupe d'essais les mortiers ont été comprimés fortement dans les moules ; dans un deuxième groupe d'essais les mortiers ont été gâchés à la consistance ordinaire du chantier.

Le rebattage n'a pas diminué la résistance des mortiers riches en ciment et comprimés fortement ; les mortiers à fort dosage en sable sont même un peu plus résistants quand ils ont été regâchés.

Les résultats sont différents en ce qui concerne les mortiers non comprimés. Le mortier 1 : 1 atteint une résistance sensiblement moins élevée quand il a été regâché.

Sixième série. — Pour se rendre compte de l'influence du rebattage quand on emploie des sables de différentes grosseurs, on a confectionné des mortiers au dosage de 1 : 3, avec du gros sable et avec du sable fin ; les uns ont été comprimés et les autres gâchés à la consistance du mortier ordinaire.

Pour regâcher le mortier, on a attendu plusieurs heures après la prise complète.

Avec les mortiers comprimés on constate encore peu de différence entre les mortiers gâchés normalement et ceux qui ont été regâchés. Mais quand il s'agit des mortiers non comprimés la diminution de résistance des mortiers composés de sable fin est considérable.

En résumé, ces expériences paraissent indiquer que le rebattage, en ce qui concerne la résistance, n'altère en rien la qualité du ciment puisque les mortiers comprimés atteignent la même résistance, qu'ils aient été ou non regâchés.

La diminution de résistance des mortiers regâchés quand le dosage en ciment est élevé et qu'ils ne sont pas comprimés dans les moules, provient de ce que le mortier, après avoir été rebattu, ne se tasse pas de lui-même comme le mortier gâché normalement ; il en résulte que la densité est plus faible, comme on peut le constater dans tous les essais.

Cette différence, dans la manière dont se comporte le mortier au gâchage, est surtout bien nette avec le ciment pur. Lorsque l'on gâche du ciment pur, en pâte ferme, on sait qu'une certaine

quantité d'eau reflue à la surface de la pâte, une fois que celle-ci a été laissée quelque temps en repos, et qu'il se produit un tassement plus ou moins important selon que la prise est lente ou rapide ; on dit que le ciment rejette son eau. Avec un ciment regâché après la prise, ce fait ne se produit pas ; la pâte est plus plastique, plus grasse, elle ne se tasse pas d'elle-même et elle conserve exactement la forme qui lui est donnée.

La prise des mortiers regâchés est toujours beaucoup plus lente que celle des mortiers gâchés normalement. Il est à remarquer qu'elle se produit à peu près dans le même temps avec tous les ciments ; ainsi, qu'un mortier ait fait prise en 10 minutes ou en 3 heures, le mortier regâché prendra dans les deux cas en 8 à 10 heures. Ce fait, rapproché de ce que l'on observe avec les mortiers regâchés et comprimés fortement, démontre que dans les ciments Portland l'aluminate de chaux, dont le rôle est très important en ce qui concerne la prise, n'a pas d'action sur la solidification.

Il en résulte que le rebattage doit avoir peu d'influence sur les produits siliceux tandis qu'il doit altérer profondément les ciments alumineux. C'est, en effet, ce que l'on constate en pratique ; les chaux et les ciments Portland peuvent être regâchés sans inconvénient ; mais la résistance d'un mortier de ciment de Vassy est considérablement diminuée par le rebattage.

L'augmentation de résistance des mortiers maigres regâchés nous semble pouvoir être expliquée ainsi : M. Le Chatelier a montré que la forme allongée des cristaux avait une grande influence sur la solidification ; les cristaux sont d'autant plus allongés qu'ils se précipitent d'une dissolution plus fortement sursaturée.

Quand un mortier est riche en ciment, la production de cristaux allongés est favorable au durcissement parce qu'ils peuvent s'enchevêtrer les uns dans les autres. Mais si la quantité de sable est très grande, les cristaux allongés se trouvent isolés et dans des conditions défectueuses pour agglomérer les grains de sable. Le regâchage a pour effet de redissoudre en partie les cristaux déjà formés, ou de les briser et de créer ainsi une grande quantité de centres de cristallisation ; les cristaux restent alors très

petits mais beaucoup plus nombreux. On observe journellement ce fait au laboratoire avec différents sels.

Cette cristallisation confuse procure une résistance moins grande quand le mortier est riche en ciment. Avec les mortiers maigres, les cristaux très petits ont, au contraire, une action plus efficace parce qu'ils entourent mieux les grains de sable et qu'ils forment une masse plus homogène en remplissant plus complètement les vides du sable.

Les mortiers faits avec du sable fin demandent, pour être réduits en pâte, une grande quantité d'eau. Il en résulte que le ciment, au moment où le mortier a fait prise, a été attaqué beaucoup plus profondément que dans le cas où le mortier est gâché avec peu d'eau, comme cela se produit quand on emploie du gros sable (1) ; non seulement l'aluminate a été complètement hydraté, mais probablement aussi une partie importante du silicate. Lorsqu'un pareil mortier est regâché, il présente l'aspect d'un mortier de chaux grasse ; il contient, en effet, beaucoup d'hydrate de chaux provenant de la décomposition du silicate. D'ailleurs, il doit arriver rarement que les mortiers de sable fin se trouvent regâchés car ils prennent généralement très lentement, précisément à cause de la grande quantité d'eau nécessitée par le gâchage.

Le regâchage des mortiers n'aurait pas, en somme, une

(1) L'expérience suivante met en évidence l'influence de la quantité d'eau de gâchage sur la dissolution des sels qui déterminent la prise et le durcissement.

Désignation		Quantité de ciment agité dans 200 cc. d'eau distillée			
		200 gr.	100 gr.	50 gr.	5 gr.
		gr.	gr.	gr	gr.
Quantité de chaux en dissolution, en grammes par litre, après	10 minutes. . .	1,830	1,525	1,037	0,244
	6 heures . . .	3,660	2,440	1,891	0,549
	12 heures . . .	3,050	2,379	2,135	1,220
Quantité de chaux enlevée, pour 1 gramme de ciment, après	10 minutes. . .	0,00183	0,00305	0,00415	0,00976
	6 heures . . .	0,00366	0,00488	0,00756	0,02196
	12 heures . . .	0,00305	0,00475	0,00854	0,04330

influence bien funeste si l'on devait tenir compte uniquement de la résistance à la traction ou à la compression. Mais l'emploi des mortiers rebattus présente d'autres inconvénients qui, dans certains cas, peuvent être très importants.

En premier lieu, un mortier regâché prend du retrait parce qu'il se dessèche avant d'avoir acquis une dureté suffisante. De plus, l'adhérence aux matériaux est bien moindre que celle des mortiers gâchés normalement. Voici à ce sujet quelques expériences exécutées avec l'appareil spécial destiné à mesurer la force d'adhérence des mortiers aux matériaux :

Désignation		Charge ayant déterminé la rupture, par cc., après	
		7 jours	28 jours
		k.	k.
Mortier 1 : 3 comprimé	Gâché normalement.	3,10	7,08
	Regâché	1,70	3,10
Mortier 1 : 3 comprimé	Gâché normalement.	3,70	7,80
	Regâché	1,70	2,23
Mortier 1 : 3 non comprimé	Gâché normalement.	»	8,33
	Regâché	»	3,75
Mortier 1 : 3 non comprimé	Gâché normalement.	»	5,20
	Regâché	»	3,85
Mortier 1 : 3 non comprimé	Gâché normalement.	»	5,47
	Regâché	»	3,06

(Le mortier était appliqué sur des plaques de marbre présentant une surface de 24 centimètres carrés. Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau).

L'infériorité des mortiers regâchés, au point de vue de l'adhérence, est donc bien certaine.

Enfin, les mortiers regâchés paraissent se décomposer assez rapidement quand ils sont traversés par l'eau de mer. Nous avons observé que des mortiers gâchés normalement, soumis depuis trois ans à une filtration d'eau de mer, ne présentaient aucune trace d'altération, tandis que les mêmes mortiers, regâchés, se sont décomposés rapidement. Nous avons remarqué également que la décomposition se produit plus vite quand le

mortier est gâché à la consistance ordinaire du mortier à maçonner que lorsqu'il est fortement comprimé. Les mortiers de sable fin se décomposent, même quand ils n'ont pas été regâchés, mais s'ils l'ont été, la décomposition se produit beaucoup plus rapidement.

La destruction rapide des mortiers regâchés, parcourus par l'eau de mer, doit être attribuée sans doute à la cristallisation confuse produite par le regâchage.

En résumé, on peut conclure de ce qui précède que dans les travaux à l'air ou à l'eau douce le rebattage des mortiers n'a d'inconvénient sérieux que si une prise et un durcissement rapides sont nécessaires, ou si l'on emploie du sable fin ou bien encore quand on attache plus d'importance à l'adhérence du mortier aux matériaux qu'au degré de dureté qu'il peut atteindre.

Influence du rebattage sur la résistance des mortiers.

Première série d'expériences. — Mortiers 1 : 3. — Comprimés fortement dans les moules.

Numéros d'ordre des échantillons	Mode de confection des mortiers	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par cc. 7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	3 ans
				k.	k.	k.	k.	k.	k.
1	Gâchage normal	11	2,11	11,5	18,5	21,9	»	29,5	33,4
	Mortier regâché 5 h. 30 après le premier gâchage	13	2,13	12,9	18,0	23,5	»	28,5	35,1
2	Gâchage normal	10,5	2,08	11,5	17,4	22,1	23,2	25,8	30,3
	Mortier regâché 12 h. après le premier gâchage	12,0	2,09	10,6	15,9	23,7	26,0	25,7	30,2
	Mortier regâché 24 h. — —	12,5	2,04	8,1	11,9	22,7	21,7	25,0	33,0
3	Gâchage normal	10,5	2,12	13,0	18,3	25,5	28,8	25,7	34,8
	Mortier regâché 12 h. après le premier gâchage	12,0	2,04	7,5	12,6	19,6	23,2	23,2	30,7
	Mortier regâché 24 h. — —	13,0	2,02	7,9	11,6	19,9	22,8	21,5	29,5
4	Gâchage normal	10,5	2,07	9·0	15,3	19,1	19,5	20,0	22,5
	Mortier regâché 6 h. après le premier gâchage	13	2,07	11,4	17,6	20,5	22,6	22,2	23,8
	Mortier regâché 12 h. — —	14	2,04	6,0	9,7	17,4	17,7	20,5	19,0
	Mortier regâché 24 h. — —	13	2,09	9,9	13,7	23,4	23,2	22,8	28,2
5	Gâchage normal	10,5	2,15	19,5	26,0	35,5	34,8	42,0	43,2
	Mortier regâché 1 h. après le premier gâchage	11,5	2,15	22,2	32,0	34,1	35,8	38,6	45,2
	Mortier regâché 5 h. — —	12	2,15	24,1	30,1	34,0	33,5	36,7	40,7

Influence du rebattage sur la résistance des mortiers

Deuxième série d'expériences. — Mortiers conservés dans l'eau et à l'air.
Mortiers 1 : 3. — Comprimés fortement dans les moules.

Numéro d'ordre des échantillons	Mode de confection des mortiers	Densité des éprouvettes	Quantité d'eau de gâchage	Résistance par centimètre carré à la traction											
				Mortiers conservés dans l'eau						Mortiers conservés à l'air					
				7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	3 ans	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	3 ans
				k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.
1	Gâchage normal.	10,5	2,13	7,7	14,4	20,5	24,5	31,5	35,0	10,7	20,9	31,5	33,0	38,5	59,5
	Mortier regâché.	12,0	2,14	9,0	13,9	20,6	23,7	25,7	31,7	10,7	20,6	30,2	38,8	47,3	73,7
2	Gâchage normal.	10,5	2,14	13,1	20,5	27,1	30,2	35,8	35,7	15,4	29,9	35,6	46,5	58,8	61,8
	Mortier regâché.	12,0	2,13	10,9	16,9	25,5	26,5	30,7	30,6	10,5	17,0	35,8	41,8	54,3	66,7
3	Gâchage normal.	10,5	2,14	9,9	17,4	22,5	26,5	33,7	33,8	11,6	19,9	33,6	43,0	57,3	65,2
	Mortier regâché.	12,0	2,13	7,9	14,4	19,6	21,5	25,0	32,0	10,0	22,2	34,5	38,3	44,7	54,7
4	Gâchage normal	10,5	2,13	10,6	17,9	20,2	22,3	23,0	26,8	13,0	25,2	36,2	39,5	45,2	45,2
	Mortier regâché.	12,0	2,14	12,2	17,9	20,2	21,8	24,0	27,5	16,4	23,2	34,9	35,2	46,5	54,8
5	Gâchage normal.	10,5	2,15	10,6	19,4	22,4	23,3	24,2	33,0	12,4	27,2	30,2	35,8	47,0	56,0
	Mortier regâché.	12,0	2,19	13,0	22,6	24,2	23,8	31,7	34,7	15,4	34,6	34,9	36,0	48,0	61,2
6	Gâchage normal.	10,5	2,14	10,7	17,5	22,2	21,8	28,8	31,8	12,9	28,0	38,6	37,8	52,2	73,3
	Mortier regâché.	12,0	2,16	12,1	19,9	24,0	24,3	29,5	32,2	12,0	27,2	36,8	36,7	42,8	68,7
7	Gâchage normal.	10,5	2,18	10,4	17,5	26,2	26,2	35,5	37,0	12,4	20,4	25,8	40,3	45,7	53,0
	Mortier regâché.	10,5	2,20	13,2	22,1	28,5	29,0	34,8	34,7	12,9	21,2	32,1	35,0	51,0	77,5
8	Gâchage normal.	10,5	2,16	12,2	20,2	21,7	24,5	33,3	29,5	11,7	23,2	32,0	36,8	54,3	60,8
	Mortier regâché.	12,0	2,17	14,0	20,9	24,6	27,2	30,0	33,3	15,6	26,1	31,4	38,3	52,0	72,0
9	Gâchage normal	10,5	2,09	10,1	15,6	20,0	23,8	29,5	32,0	9,7	21,5	25,2	33,0	47,5	58,5
	Mortier regâché.	12,0	2,13	9,4	15,0	20,7	22,6	26,0	31,5	11,2	21,4	25,7	38,8	45,2	63,5
10	Gâchage normal.	10,5	2,15	9,0	14,7	18,2	23,7	30,1	35,0	14,4	21,4	27,7	33,3	38,8	57,2
	Mortier regâché.	12,5	2,14	9,5	12,2	19,9	24,3	29,3	30,3	10,1	16,0	24,0	33,7	41,5	62,3
11	Gâchage normal.	10,5	2,16	8,4	11,9	16,2	21,5	28,7	34,2	11,5	22,3	25,7	34,5	41,0	63,2
	Mortier regâché.	13,0	2,19	8,4	14,1	21,1	27,5	31,0	34,8	10,5	22,0	25,1	34,3	41,7	57,3
12	Gâchage normal.	10,5	2,16	8,7	12,6	23,4	25,2	31,0	33,3	10,4	22,4	21,7	35,0	42,7	51,8
	Mortier regâché	11,5	2,18	7,6	13,1	21,6	28,3	29,8	32,8	9,2	20,2	25,1	27,5	39,8	57,2
13	Gâchage normal.	10,5	2,18	10,5	16,2	24,6	29,0	35,8	32,5	11,6	23,8	27,5	41,5	48,2	55,5
	Mortier regâché.	12,5	2,20	9,2	17,4	24,7	30,8	35,6	36,6	9,2	21,7	25,7	31,3	45,5	56,7
Moyenne des 13	Gâchage normal.	»	»	10,1	16,6	21,9	24,8	30,8	33,0	12,1	23,5	30,0	37,7	47,5	58,5
	Mortier regâché.	»	»	10,4	16,9	22,7	25,5	29,4	32,6	11,8	23,3	30,4	35,1	46,2	63,5

Troisième série. — Mortiers conservés dans l'eau de mer. — Mortier 1 : 3 Comprimé fortement dans les moules.

Numéro d'ordre des échantillons	Mode de confection des mortiers	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par cc. à la traction — Mortiers conservés dans l'eau					
				7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	3 ans
				k.	k.	k.	k.	k.	k.
1	Gâchage normal	10,5	2,16	9,0	15,0	21,5	23,2	29,7	31,3
	Mortier regâché	13,5	2,09	5,0	9,4	16,0	20,4	24,0	28,0
2	Gâchage normal	10,5	2,14	16,1	19,7	22,6	25,2	28,7	30,2
	Mortier regâché	13,5	2,13	9,0	15,0	18,7	20,4	23,8	28,5
3	Gâchage normal	10,5	2,19	17,5	22,5	24,5	23,9	28,2	34,5
	Mortier regâché	12,5	2,17	14,1	17,2	19,4	22,2	25,3	31,2
4	Gâchage normal	10,5	2,18	13,0	17,9	21,0	20,2	30,2	35,5
	Mortier regâché	12,5	2,14	10,1	13,1	17,4	17,5	24,8	32,0
5	Gâchage normal	10,5	2,09	10,9	13,5	18,2	»	23,5	»
	Mortier regâché	12	2,09	8,1	11,5	15,2	»	19,9	»

Quatrième série. — Essais à la compression. — Mortier 1 : 3. — Comprimé fortement dans les moules. — Éprouvettes conservées dans l'eau.

Numéro d'ordre des échantillons	Mode de confection des mortiers	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par cc. à la compression — Mortiers conservés dans l'eau					
				7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	3 ans
				k.	k.	k.	k.	k.	k.
1	Gâchage normal	10,5	2,17	140,0	203,0	276,7	283,3	353,3	393,3
	Mortier regâché	12,5	2,14	105,0	186,7	226,7	243,3	260,0	293,3
2	Gâchage normal	10,5	2,15	91,7	150,0	210,0	216,7	256,7	283,3
	Mortier regâché	12,5	2,15	68,3	143,3	161,7	175,0	200,0	240,0
3	Gâchage normal	10	2,22	141,7	220,0	258,3	320,0	350,0	333,3
	Mortier regâché	11	2,21	145,0	201,7	251,7	280,0	316,7	340,0
4	Gâchage normal	10	2,21	108,3	165,0	210,0	273,3	286,7	313,3
	Mortier regâché	11	2,21	81,7	128,3	201,7	220,0	246,7	256,7

Cinquième série. — Mortiers à différents dosages

Numéro d'ordre des échantillons	Mode de confection des mortiers	Composition des mortiers	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par cent. c. à la traction: 7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	3 ans
I. Mortiers comprimés fortement. — Éprouvettes conservées dans l'eau										
					kg.	kg.	kg.	kg.	kg	kg.
1	Mortiers gâchés normalement	1 de ciment 1 de sable	11,0	2,27	37,6	40,6	48,6	42,7	55,7	68,8
		1 : 2	11,0	2,23	25,6	32,5	40,6	34,3	46,7	52,5
		1 : 3	10,5	2,15	17,5	26,4	30,4	31,6	35,1	40,8
		1 : 5	10,5	1,94	8,0	15,1	18,6	18,0	22,8	22,2
	Mortiers regâchés environ 3 heures après la prise.	1 : 1	13	2,24	33,7	40,2	50,4	52,3	56,8	56,2
		1 : 2	12	2,22	28,9	31,2	43,0	44,2	51,0	49,5
		1 : 3	11,5	2,14	20,9	27,7	30,9	31,3	38,8	39,8
		1 : 5	11,5	1,96	11,4	17,9	20,4	20,2	24,0	24,5
2	Mortiers gâchés normalement	1 : 1	11	2,27	30,6	36,2	47,7	50,8	53,0	57,5
		1 : 2	10,5	2,22	23,2	27,3	34,9	32,0	42,0	44,3
		1 : 3	10,5	2,11	11,6	19,2	26,6	29,7	33,7	34,2
		1 : 5	10,5	1,91	6,8	6,6	10,1	9,2	14,5	15,7
	Mortiers regâchés environ 1 heure après la prise.	1 : 1	13	2,23	34,6	30,0	42,1	46,0	51,3	55,7
		1 : 2	12	2,19	25,0	26,7	35,0	37,3	44,3	45,0
		1 : 3	12	2,11	16,4	17,5	24,2	26,2	33,0	33,7
		1 : 5	11,5	1,91	7,2	10,0	13,9	15,7	19,8	18,5
2. Mortiers non comprimés. Gâchage à la consistance ordinaire du chantier.										
1	Mortiers gâchés normalement	1 : 1	16	2,19	27,4	29,0	43,0	44,3	50,3	54,7
		1 : 2	15	2,09	16,5	20,5	27,6	34,5	35,5	40,3
		1 : 3	15	1,99	9,7	15,7	20,5	22,7	28,5	27,8
		1 : 5	15	1,87	4,0	6,2	9,7	10,0	13,8	13,0
	Mortiers regâchés environ 1 heure après la prise	1 : 1	18	2,11	26,0	25,9	37,2	38,2	41,5	45,0
		1 : 2	16	2,06	19,6	21,5	32,0	32,6	35,5	35,8
		1 : 3	16	1,90	10,5	15,1	21,6	22,5	27,2	26,2
		1 : 5	16	1,80	4,5	6,0	9,0	10,8	14,0	26,3
2	Mortiers gâchés normalement	1 : 1	15,5	2,16	21,1	31,4	34,9	40,3	42,4	47,0
		1 : 2	14,5	2,00	11,7	20,7	22,7	27,7	32,3	32,7
		1 : 3	15,0	1,91	5,9	12,1	16,2	20,5	20,8	23,5
		1 : 5	15,5	1,80	2,8	4,0	5,4	7,5	8,7	9,0
	Mortiers regâchés environ 1 heure après la prise	1 : 1	19,5	2,06	15,6	29,6	28,6	30,8	36,0	36,2
		1 : 2	17,5	1,93	8,9	19,6	20,7	24,0	24,2	26,3
		1 : 3	17,0	1,84	7,5	12,9	15,2	15 2	17,7	21,2
		1 : 5	17,5	1,78	2,7	5,9	8,1	9,8	10,0	10,5

Sixième série. — Mortiers confectionnés avec des sables de différentes grosseurs

Numéro d'ordre des échantillons	Mode de confection des mortiers	Nature du sable employé pour la confection du mortier	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par c. c. à la traction — 7 jours	28 jours	3 mois	1 an	3 ans
1. *Mortiers comprimés fortement. — (Mortier* 1 : 3). — *Conservés dans l'eau*									
					k.	k.	k.	k.	k.
1	Mortier gâché normalement	Gros sable . . .	10	2,18	18,1	24,1	29,2	36,9	37,0
		Sable fin. . . .	11,5	2,03	16,4	21,2	26,9	35,1	34,7
	Mortier regâché après la prise	Gros sable. . .	11,5	2,16	19,7	24,5	26,1	35,0	38,2
		Sable fin. . . .	12,0	2,06	17,5	18,5	23,2	27,7	30,0
2	Mortier gâché normalement	Gros sable . . .	9,5	2,15	12,2	21,5	28,1	37,9	37,5
		Sable fin. . . .	11,0	2,05	10,5	17,4	23,9	32,2	32,2
	Mortier regâché	Gros sable . . .	12,5	2,11	10,4	17,0	22,6	28,7	31,2
		Sable fin. . . .	13,0	2,05	10,9	15,9	20,4	25,0	25,3
2. *Mortiers non comprimés. Gâchage à la consistance ordinaire du chantier. (Mortier* 1 : 3.) — *Conservés dans l'eau.*									
1	Mortier gâché normalement	Gros sable . . .	14,0	2,02	11,5	20,5	23,1	31,6	28,2
		Sable fin. . . .	20,0	1,93	8,2	14,1	19,4	26,9	25,7
	Mortier regâché	Gros sable. . .	16,0	1,93	7,1	14,7	17,2	25,6	23,4
		Sable fin. . . .	21,5	1,71	0,0	7,0	8,0	11,4	13,7
2	Mortier gâché normalement	Gros sable. . .	14,0	1,90	3,5	6,5	9,2	19,2	21,5
		Sable fin. . . .	19,0	1,82	3,1	6,1	8,8	17,1	16,2
	Mortier regâché	Gros sable . . .	16,0	1,89	4,7	10,2	13,4	23,3	21,5
		Sable fin	22,5	1,69	0,0	3,9	6,5	9,6	12,2

ANNEXE VI

THÉORIE DE LA PRISE DES CIMENTS ET PHÉNOMÈNES ANORMAUX QU'ELLE PRÉSENTE

La prise des produits hydrauliques est restée pendant très longtemps sous explications positives et les hypothèses les plus diverses ont été émises à ce sujet ; on s'efforçait de concilier les phénomènes observés avec des théories plus ou moins plausibles et l'on s'occupait beaucoup moins de rechercher les causes que de constater les effets. De là, des divergences de vues très grandes entre praticiens et la persistance de cette idée que les anomalies constatées dans la prise des ciments étaient inexplicables.

Les travaux de M. Le Châtelier ont apporté dans cette question des données absolument positives et l'on peut affirmer qu'aujourd'hui le mécanisme de la prise des produits hydrauliques est parfaitement connu. Il reste assurément des points obscurs et l'on devra encore recourir aux hypothèses pour expliquer certains phénomènes ; mais du moins on possède des notions précises sur les causes principales et le point de départ de toute étude nouvelle sur la prise des mortiers est bien nettement indiqué.

Le principe fondamental sur lequel repose toute la théorie de la prise est le suivant :

(1) Extrait d'un rapport présenté au Congrès de Zurich pour l'unification des méthodes d'essais (septembre 1895).

La cristallisation qui accompagne la prise de tous les corps durcissant dans l'eau résulte de la production préalable d'une dissolution sursaturée, et la solubilité des corps mis à durcir au contact de l'eau influe sur la rapidité de la cristallisation et par suite sur celle de la prise (1).

Dans les produits hydrauliques on rencontre de la silice, de l'alumine, de l'oxyde de fer, de la chaux, de l'acide sulfurique et accessoirement de la magnésie. Bien que l'on n'ait pas réussi à isoler les combinaisons qui existent entre ces divers éléments, on peut affirmer que la chaux est combinée à la silice, à l'alumine et à l'acide sulfurique pour former du silicate, de l'aluminate et du sulfate de chaux. Le rôle de l'oxyde de fer est moins bien établi et ne paraît pas d'ailleurs présenter beaucoup d'intérêt.

Le rôle de silicate de chaux peut être étudié facilement avec les grappiers purs que l'on peut isoler dans certaines chaux hydrauliques en les traitant convenablement et qui sont composés à peu près exclusivement de silicate de chaux : $SiO^2, 3CaO$.

La présence et le rôle de l'aluminate de chaux dans les ciments à prise rapide et dans les ciments Portland est démontrée par un grand nombre de faits dont nous nous bornerons à citer quelques-uns.

Si l'on agite du ciment frais, en poudre fine, avec une solution concentrée de chlorure de calcium et que l'on jette le tout sur un filtre après quelques instants, on constate dans le liquide filtré une quantité considérable d'alumine en dissolution ; la même chose se produit si l'on remplace le ciment par de l'aluminate de chaux finement pulvérisé.

En répétant l'expérience avec un ciment éventé, c'est-à-dire dans lequel l'aluminate de chaux instable en présence de l'air, s'est déjà hydraté, on ne constate plus la présence de l'alumine dans la solution. Dans le premier cas, le ciment prend rapidement, dans le second la prise est très lente.

(1) *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*, par M. H. Le Chatelier, Ingénieur en Chef des Mines — Annales des Mines — Mai — Juin 1887.

L'aluminate de chaux ne peut se dissoudre que très lentement dans une solution contenant de la chaux en quantité suffisante, surtout si, en même temps, il existe aussi dans la solution du sulfate de chaux. Un ciment contenant à la fois de la chaux libre hydratée et du sulfate de chaux doit, par conséquent, prendre très lentement et c'est ce que l'on constate, en effet.

Dans les solutions faibles de chlorure de calcium, à 30 ou 40 grammes par litre, l'aluminate de chaux entre très lentement en dissolution ; le ciment gâché avec une pareille solution met très longtemps à prendre alors même que sa prise à l'eau ordinaire est extrêmement rapide.

Si l'on mélange du ciment Portland prenant très rapidement avec du sable humide contenant 4 à 5 % d'eau et qu'après 30 à 40 minutes, ou même moins, on sépare le ciment du sable avec un tamis, on constate que la prise du ciment est devenue très lente : l'aluminate s'est hydraté et son action sur la prise a été annulée (1).

Quand on cherche à retarder la prise des ciments contenant de l'aluminate de chaux avec un des sels dont nous avons parlé plus haut, chaux, sulfate de chaux, ou chlorure de calcium, il faut que la quantité employée soit d'autant plus grande que le ciment contient plus d'alumine.

Les ciments renfermant de l'aluminate de chaux en quantité importante, comme les ciments de Vassy et de Grenoble, sont profondément altérés quand on détruit cet aluminate soit en regâchant le mortier après la prise, soit en délayant le ciment dans un grand excès d'eau que l'on agite pendant quelques minutes.

Avec les ciments qui, tout en faisant prise rapidement, comme certains ciments Portland, contiennent relativement peu d'aluminate de chaux et beaucoup de silicate, la destruction de l'aluminate ne diminue pas la résistance ; le ciment regâché après la prise acquiert la même dureté et si on agite le ciment

(1) Voir Annexe IV. Influence du degré d'humidité du sable sur la prise et le durcissement des mortiers.

dans un excès d'eau considérable puis qu'on laisse la poudre se déposer, elle devient au bout de peu de temps extrêmement dure.

Tous les ciments siliceux contenant très peu d'alumine prennent très lentement, tous les ciments qui renferment depuis 3 à 4 % jusqu'à 11 à 12 % d'alumine prennent rapidement et d'autant plus vite que leur teneur en alumine est plus élevée, pourvu, toutefois, qu'ils ne contiennent pas en même temps une quantité de sulfate de chaux ou de chaux hydratée suffisante pour neutraliser l'action de l'aluminate.

On ne saurait donc mettre en doute que la prise des ciments est due à la production de dissolutions sursaturées d'aluminate et de silicate de chaux. Le premier de ces sels entre très rapidement en dissolution dans l'eau, le second est au contraire attaqué lentement par l'eau. Les produits hydrauliques qui sont composés pour ainsi dire exclusivement soit d'aluminate, soit de silicate de chaux prennent toujours, comme nous l'avons dit plus haut, ou très rapidement ou très lentement. Mais quand les deux sels se trouvent mélangés en proportions variables, ce qui est le cas des ciments Portland, la prise est tantôt lente, tantôt rapide selon la quantité d'aluminate et les conditions dans lesquelles il se trouve au moment du mélange avec l'eau.

Ces données sur la prise étant admises, on peut expliquer facilement les causes des anomalies que l'on rencontre dans la prise des ciments. On peut dire que, dans les phénomènes de prise, et bien entendu dans les conditions ordinaires de la pratique, il n'existe que trois corps susceptibles d'influer sur la prise ; ce sont la chaux, le chlorure de calcium et le sulfate de chaux.

Disons tout d'abord que les ciments exclusivement siliceux ont une prise très régulière et toujours lente ; les diverses conditions dans lesquelles ils peuvent se trouver au moment de gâchage ne modifient pas sensiblement la durée de prise.

Mais dès que la teneur en alumine atteint 3 à 4 % on constate parfois des phénomènes de prise en apparence inexplicables. La chaux seule peut retarder la prise d'un ciment

puisque, en présence de cette base, l'aluminate de chaux ne peut se dissoudre que lentement dans l'eau. Mais comme la chaux en dissolution dans l'eau se carbonate rapidement et que la liqueur s'appauvrit très vite, il faut relativement de grandes quantités de chaux pour neutraliser l'action de l'aluminate. Ainsi pour retarder notablement la prise d'un ciment Portland contenant 6 à 8 °/₀ d'alumine, il faudrait au moins 8 à 10 °/₀ de chaux. Avec un ciment prompt, genre Vassy, cette même quantité de chaux n'aurait aucune action et on n'obtiendrait un résultat appréciable qu'avec 20 à 30 °/₀ de chaux hydratée.

Le chlorure de calcium en solution faible, à 30-40 grammes par litre, ralentit toujours la prise des ciments ne contenant que 6 à 8 °/₀ d'alumine ; nous avons fait voir que c'est à ce sel que l'on doit attribuer le ralentissement de prise observé quand on emploie de l'eau de mer pour le gâchage.

Le rôle du sulfate de chaux est, de tous les sels contenus dans les ciments, celui dont l'action a la plus grande influence sur la prise.

Si l'on agite dans un grand excès d'eau de la poudre de ciment très finement pulvérisée et que, toutes les dix minutes, par exemple, on dose dans une partie du liquide filtré la chaux et le sulfate de chaux en dissolution, on remarque que la quantité de chaux augmente constamment tandis que le sulfate de chaux, d'abord en assez grande abondance, diminue peu à peu et disparaît complètement au moment où la prise se produit. C'est un fait auquel nous n'avons constaté aucune exception, à moins que la proportion de sulfate ajoutée au ciment ne fût tout à fait exagérée ou quand le ciment contenait très peu d'alumine (Annexe I).

Quant à l'alumine, on n'en trouve jamais de trace dans le liquide clair quand le ciment renferme un peu de chaux hydratée; elle apparaît, au contraire, immédiatement avec les ciments qui sont exempts de chaux libre.

La quantité de sulfate de chaux qui peut entrer en dissolution au moment où on met le ciment en contact avec l'eau est très considérable ; nous en avons constaté parfois jusqu'à 20 grammes par litre.

Cette disparition du sulfate de chaux dans l'eau de gâchage au moment de la prise nous a conduit à découvrir une combinaison de l'aluminate de chaux avec le sulfate de chaux, sel double que l'on peut obtenir facilement en grands cristaux et dont la formule est (Al^2O^3, 3CaO) 2,5 (So^3, CaO) + Aq.

Ce sel a été étudié depuis par M. le Dr Michaëlis qui a trouvé la même formule (1).

Nous pouvons maintenant examiner le rôle des trois éléments dont nous venons de parler et déterminer leur influence sur la prise des ciments. Si l'aluminate de chaux ne rencontre pas d'obstacle et peut se dissoudre rapidement, c'est-à-dire, en l'absence de chaux hydratée, il s'empare aussitôt du sulfate de chaux pour former du sulfoaluminate insoluble et le ciment prend très vite.

Si le ciment contient de la chaux hydratée, celle-ci empêche la dissolution de l'aluminate, le sulfate de chaux reste en liberté et ne se combine que lentement à l'aluminate.

L'expérience suivante rend compte d'une manière saisissante de ces divers phénomènes :

Un ciment contenant 1 à 2 °/₀ de sulfate de chaux et prenant en quelques minutes a été agité avec un poids égal d'eau. On a constaté, en prélevant un échantillon d'un liquide clair après cinq minutes, 0gr,180 d'alumine par litre et aucune trace de sulfate.

On a repris le même ciment mais on lui a ajouté 3 °/₀ de chaux hydratée en poudre. Après avoir répété la même opération que ci-dessus, on n'a plus constaté de trace d'alumine, mais on a trouvé 5gr,025 de sulfate de chaux par litre.

De tous les phénomènes anormaux que l'on constate dans les essais de prise le plus fréquent est celui dont nous allons parler. Un ciment essayé quelques jours après sa fabrication prend très lentement, en 6 à 8 heures par exemple ; il est conservé en sac ou en baril dans un magasin ou au laboratoire ; quelques semaines plus tard on essaie de nouveau ce

(1) Voir annexe I. Rôle du chlorure de calcium et du sulfate de chaux sur la prise et le durcissement des mortiers.

ciment ; on trouve que la prise se produit en quelques minutes.

Nous avons fait des observations de ce genre sur un très grand nombre d'échantillons de ciment ; nous n'en donnerons qu'un seul exemple bien caractéristique : Un ciment Portland conservé dans un bocal fermé par un bouchon en liège présentait au bout d'un mois une prise de 6h25 ; après cinq mois la durée de prise n'était plus que de 18 minutes.

Ce fait s'explique très bien en se reportant à l'expérience citée plus haut. Dans le ciment frais il existe toujours une petite quantité de chaux hydratée qui se dissoud très rapidement aussitôt que le ciment est mis en présence de l'eau ; le sulfate de chaux peut entrer en même temps en dissolution et l'aluminate est attaqué lentement par l'eau. Mais la chaux libre du ciment se carbonate au contact de l'air et se trouve neutralisée complètement au bout d'un certain temps ; dès lors rien ne s'oppose à la dissolution de l'aluminate de chaux et à sa combinaison avec le sulfate ; le ciment prend, par conséquent, très vite. On peut, d'ailleurs, rendre de nouveau la prise lente à ce moment par une simple addition de chaux hydratée.

Les anomalies dues à des causes d'ordre chimique résultent, à peu près exclusivement, de la présence dans les ciments du sulfate de chaux, soit qu'ils en contiennent naturellement soit que le sulfate ait été ajouté après cuisson. On peut en conclure que l'action de l'air sur le ciment pouvant être plus ou moins importante suivant le temps et le mode de conservation, l'essai de la prise ne peut avoir d'utilité que si le ciment est expérimenté peu de temps avant l'emploi.

En ce qui concerne les phénomènes d'ordre physique qui produisent des anomalies dans la prise ou qui se manifestent pendant la prise, nous pouvons citer les suivants :

Une cause d'erreur assez fréquente provient du délai imposé pour le gâchage du ciment pur et qui est, comme on le sait, de cinq minutes. Certains ciments Portland font prise avec une extrême rapidité, parfois en moins d'une minute ; quand on gâche de pareils ciments pendant cinq minutes, la première prise est détruite par le gâchage et le ciment prend en apparence lentement. Certains caractères permettent, d'ailleurs, de recon-

naître que la prise s'est produite pendant le gâchage. Le commencement de durcissement occasionné par la prise amène l'expérimentateur à employer une quantité d'eau exagérée pour le gâchage ; il faut jusqu'à 30 à 35 % d'eau pour obtenir une pâte de consistance normale. De plus, la pâte est très grasse, difficile à malaxer ; elle est très plastique et, ce qui est surtout un indice certain, elle ne s'affaisse pas et ne rejette pas d'eau comme cela se produit toujours avec les ciments prenant normalement. Si l'on recommence l'expérience après avoir laissé le ciment à l'air pendant quelques jours, on est très étonné de trouver une prise beaucoup plus rapide, de dix à quinze minutes ; mais cette fois c'est la prise réelle que l'on constate parce que le ciment a subi un certain éventement.

Les fentes transversales des galettes de ciment, les soulèvements ne sont pas des phénomènes de prise proprement dits, ils en sont plutôt les conséquences. Les fentes que l'on observe souvent avec les ciments prenant très lentement et qui se produisent presque toujours au milieu de la galette proviennent du retrait dû à la dessication ; les fissures provoquées par le gonflement partent toujours des bords pour aller vers le centre. Il suffit de maintenir la galette de ciment dans une atmosphère saturée d'humidité pour éviter ces fentes de retrait.

Si l'on immerge une galette de ciment dont la prise est très lente au moment où celle-ci paraît terminée, on remarque souvent que la surface de la galette, sur une épaisseur de 1 à 2 millimètres, se détache facilement quand on retire la galette de l'eau au bout d'un certain temps. Ce fait est surtout très net quand le ciment a été immergé dans l'eau de mer ; il est dû à ce que la partie superficielle seule a fait prise au moment de l'immersion, la partie inférieure, par suite d'une très légère contraction pendant la prise, se sépare de cette croûte que l'on peut ensuite enlever plus ou moins complétement.

Ce sont les ciments contenant une certaine quantité de sulfate de chaux qui présentent le plus souvent cette particularité par suite de l'action de l'air sur la partie superficielle de la galette. On n'observe pas de soulèvement ni, d'ailleurs, aucun phénomène anormal, si la galette est restée à l'air humide pendant

vingt-quatre heures avant l'immersion, c'est-à-dire pendant un temps suffisant pour que toute la masse soit complètement durcie.

La nécessité de maintenir les éprouvettes de ciment dans une atmosphère humide et de ne les immerger que vingt-quatre heures après le gâchage est donc bien démontrée et les prescriptions adoptées à ce sujet sont très justifiées.

De tout ce que nous venons d'exposer, nous voudrions qu'il se dégage cette idée que pour un observateur attentif il n'existe pas réellement d'anomalies dans la prise des ciments ; dans tous les phénomènes que l'on constate pendant la prise il ne se produit rien d'anormal, ils ont tous une cause bien déterminée et presque toujours très simple.

ANNEXE VII

—

I. — DEVIS ET CAHIER DES CHARGES POUR LA FOURNITURE DU CIMENT PORTLAND AU SERVICE DES PONTS ET CHAUSSÉES

Article premier. — Le ciment portland fourni proviendra exclusivement de l'usine du soumissionnaire ; il sera produit par la mouture de roches scorifiées, obtenues au moyen de la cuisson, jusqu'à ramollissement, d'un mélange intime de carbonate de chaux et d'argile, rigoureusement dosé, chimiquement et physiquement homogène dans toutes ses parties.

CONTROLE DE LA FABRICATION DANS L'USINE

Article 2. — L'Administration se réserve d'exercer son contrôle, dans les conditions qui seront déterminées par elle, sur la fabrication, la conservation en magasin à l'usine et l'expédition du ciment qui devra être fourni en exécution du présent marché.

A cet effet, l'Ingénieur ou son délégué aura accès à tout instant dans les parties de l'usine affectées à cette fourniture, et il pourra :

1° Prendre toutes les dispositions qu'il jugera nécessaires pour s'assurer de la composition des pâtes crues employées à la fabrication destinée à l'Administration ;

2° Contrôler le triage après la cuisson ;

3° Suivre le ciment soumis au contrôle depuis le triage jusqu'aux cases spéciales, où il sera emmagasiné après la mouture ;

4° Contrôler le plombage spécial à la sortie des cases et l'expédition du dit ciment ;

5° Préposer des agents spéciaux restant en permanence à l'usine, aux fins ci-dessus.

Article 3. — Lorsque le contrôle exercé dans l'usine aura fait constater, dans la fabrication du ciment, des irrégularités ou des imperfections qui seraient de nature à inspirer des doutes sur la qualité, la totalité du ciment dont la fabrication aura donné lieu à cette constatation sera déclarée suspecte, et devra être conservée par le fabricant dans les magasins de l'usine, sous la clef de l'Administration, jusqu'à parachèvement des essais, poursuivis pendant une durée de trois mois, auxquels seront soumis, dans le laboratoire de l'Administration, les échantillons prélevés par l'agent chargé du contrôle.

L'entrepreneur aura toujours la faculté de se soustraire à l'obligation de conserver ainsi dans ses magasins, pendant un délai prolongé, les ciments déclarés suspects, en renonçant à les fournir à l'Administration ; ces ciments seront alors considérés commme définitivement rebutés, et l'expédition n'en pourra être faite.

VÉRIFICATION ET ESSAIS APRÈS L'ARRIVÉE AU MAGASIN

Article 4. — Toute fourniture partielle de ciment, dès son arrivée au magasin, donnera lieu à une vérification pour constater que le ciment est parfaitement sec. L'entrée du magasin sera refusée à tout sac qui aurait été exposé à l'humidité et dont le contenu ne serait pas pulvérulent dans toutes ses parties.

Puis la partie de la fourniture reconnue admissible au point de vue de la siccité sera soumise aux essais définis par les articles 5 à 21 du présent cahier des charges relatifs :

1° A la densité du ciment ;

2° A la composition chimique ;

3° A la durée de la prise ;

4° A la déformation à froid après la prise ;

5° A la déformation à chaud après la prise ;

6° A la résistance à la traction des briquettes de ciment pur ;

7° A la résistance à la traction des briquettes de mortier de ciment avec sable normal.

A cet effet, l'Ingénieur ou son délégué fera prendre du ciment dans un ou plusieurs sacs choisis arbitrairement, à la profondeur et en des points qu'il désignera, sans mélanger les ciments provenant de sacs différents. Puis il procédera aux essais en observant les précautions prescrites.

Chacun des échantillons ainsi prélevés devra satisfaire séparément aux conditions prescrites dans les articles ci-après ; les mesures à prendre à l'égard de la totalité de la fourniture partielle seront celles qui conviendront à l'échantillon qui aura donné les résultats les moins satisfaisants.

L'entrepreneur ou son représentant aura le droit d'assister aux essais ; si une opération partielle lui paraît n'être pas faite avec les précautions prescrites par le présent devis, il fera immédiatement constater contradictoirement par l'agent préposé aux essais et le signalera sur l'heure par écrit à l'Ingénieur ordinaire, faute de quoi l'opération en question ne pourra plus servir de base à une réclamation en cas d'insuccès final des essais.

L'heure à laquelle les essais de chaque fourniture seront commencés dans le laboratoire de l'Administration sera indiquée à l'entreprise, trois heures au moins à l'avance. Dans le cas où ni l'entrepreneur ni son représentant ne se présenterait au laboratoire à l'heure indiquée, il sera passé outre ; toutes les opérations qui seront ainsi faites en l'absence de l'entrepreneur ou de son représentant, seront considérées comme bien et dûment faites, et l'entrepreneur ne sera pas admis à en contester les résultats.

POIDS MINIMUM DU LITRE DE CIMENT PASSÉ AU TAMIS de 4.900 MAILLES PAR CENTIMÈTRE CARRÉ ET NON TASSÉ

Article 5. — Le poids de la fine poussière obtenue par le tamisage du ciment à travers un tamis métallique de 4.900 mailles par centimètre carré devra être, pour un litre non tassé, au moins égal à un minimum déterminé suivant la règle exposée ci-après, faute de quoi la fourniture partielle d'où provient l'échantillon de ciment trouvé trop léger sera déclarée *suspecte.*

Pour effectuer le pesage dans des conditions toujours comparables, on procédera au remplissage d'une mesure de forme cylindrique ayant une capacité d'un litre et une hauteur de $0^m,10$ en faisant usage de l'*entonnoir à tamis.*

L'*entonnoir à tamis* est un entonnoir métallique vertical dont la section circulaire à $0^m,02$ de diamètre à la base et $0^m,15$ de diamètre à une hauteur de $0^m,15$ au-dessus de cette base, hauteur à laquelle est placée une tôle perforée horizontale, ayant 1.050 trous environ de $0^m.002$ de diamètre par décimètre carré. Cet entonnoir se prolonge par un ajutage cylindrique de $0^m,02$ de diamètre et de $0^m,10$ de hauteur. Il est supporté par un bâti en forme de trépied.

Pour effectuer le remplissage, on placera la mesure sur une table bien horizontale et inébranlable à $0^m,05$ en contre-bas de l'extrémité inférieure de l'ajutage. On versera ensuite la fine poussière de ciment dans l'entonnoir par petites quantités de 300 à 400 grammes, que l'on fera passer au travers du tamis en y promenant une spatule en bois de $0^m,04$ de largeur.

On arrêtera le remplissage quand la base du cône qui se sera élevé peu à peu dans la mesure en aura atteint le bord supérieur. On enlèvera alors l'excès du ciment en faisant glisser sur ce bord la tranche bien droite d'une lame tenue dans un plan vertical.

Pendant toute l'opération du remplissage, on n'aura fait subir à la mesure contenant le ciment aucune trépidation ni aucun choc.

Pour avoir le poids d'un litre, on fera une seule pesée du contenu total de cinq mesures remplies avec les précautions ci-dessus décrites et on en déduira le poids moyen.

Le poids minimum obligatoire du litre non tassé sera déterminé par une expérience préalable de la manière suivante :

Avant tout commencement de fourniture, on fera dans l'usine sous les yeux de l'Ingénieur ou de son délégué, par les moyens ordinaires de l'usine, la mouture et le blutage d'un lot de roches lourdes très cuites, dont chaque morceau aura jusqu'au cœur une couleur franchement noire ou noir bleuâtre, ou noir verdâtre et présentera la composition chimique qui correspond au dosage normal des pâtes de l'usine, déclaré par le fabricant. Ces roches auront été choisies par l'Ingénieur au pied d'un four en vidange qu'il aura désigné. La mouture sera conduite de manière à donner, par le blutage ordinaire, un ciment qui laisse un résidu de 20 à 25 °/₀ sur le tamis de 4,900 mailles par centimètre carré.

Le tamisage ayant été effectué sur ce tamis après refroidissement complet du ciment, on déterminera contradictoirement, suivant le mode ci-dessus décrit, le poids du litre non tassé de la fine poussière obtenue. Le chiffre ainsi trouvé, diminué de 100 grammes pour tolérance, donnera le poids minimum obligatoire.

COMPOSITION CHIMIQUE

Article 6. — Tout ciment dans lequel l'analyse chimique aura accusé plus de 1 °/₀ d'acide sulfurique ou aura découvert des sulfures en proportion dosable, sera *refusé*.

Article 7. — On déclarera *suspect* tout ciment dans lequel l'analyse chimique aura accusé plus de 4 °/₀ d'oxyde de fer, ou aura donné une valeur inférieure à 44 °/₀ pour le rapport entre le poids total de la silice combinée et de l'alumine d'une part et d'autre part le poids de la chaux.

ESSAIS AVEC PATE DE CIMENT PUR. CONFECTION DE LA PATE NORMALE DE CIMENT PUR

Article 8. — Dans tous les essais au ciment pur, le ciment sera gâché avec de l'eau de mer.

Le ciment, l'eau et l'air, pendant le gâchage, seront maintenus autant que possible à une température comprise entre 15 et 18 degrés.

On opèrera toujours sur 1 kilogramme de ciment qu'on étalera sur une table de marbre en formant une couronne au centre de laquelle on versera d'un seul coup le volume d'eau nécessaire pour la confection de la pâte. Le mélange sera gâché fortement à la truelle pendant 5 minutes comptées à partir du moment où l'eau aura été versée.

La proportion d'eau à mélanger avec le ciment pur sera la même pour tous les essais d'un même échantillon effectués dans une même journée.

Cette proportion, que l'on obtiendra au préalable par une série de tâtonnements, sera déterminée de manière à obtenir pour la pâte convenablement gâchée la consistance plastique normale définie par la condition suivante.

Une boîte métallique imperméable à fond plat de forme tronc-conique, ayant $0^m,08$ de diamètre à la base inférieure, $0^m,09$ de diamètre à la base supérieure et $0^m,04$ de profondeur, étant remplie de pâte, on dressera la surface en faisant glisser le plat de la truelle sur le bord supérieur du moule et en évitant tout tassement et toute trépidation. Au centre de la masse ainsi formée, on fera descendre normalement à la surface de la pâte, lentement et avec précaution, une sonde cylindrique de $0^m,01$ de diamètre et du poids de 300 grammes en métal poli, propre et sèche terminée par une section nette et d'équerre. La consistance de la pâte sera considérée comme normale lorsque l'épaisseur de la couche entre le fond de la boîte et l'extrémité de la sonde au moment où celle-ci cessera de s'enfoncer sous l'action de son propre poids sera $0^m,006$.

Pour déterminer la proportion d'eau qui doit être adoptée

pour la confection des pâtes d'essai, on fera d'abord le gâchage avec une quantité d'eau assez faible pour donner une pâte trop sèche dans laquelle le sonde ne pénètrera pas jusqu'à la profondeur indiquée ci-dessus, puis on recommencera l'opération le nombre de fois nécessaire en augmentant à chaque fois le poids de l'eau de 20 grammes. Lorsque deux essais consécutifs auront donné, l'une une pâte trop sèche (laissant au-dessous de l'extrémité de la sonde une épaisseur de pâte de plus de six millimètres) et l'autre une pâte trop molle (laissant au-dessous de la sonde une épaisseur de moins de six millimètres), on fera une dernière expérience avec 10 grammes d'eau de moins que dans l'opération qui aura donné la pâte trop molle.

On adoptera alors, comme proportion d'eau pour les essais, la plus faible proportion d'eau employée dans les trois dernières expériences, pour laquelle l'épaisseur de pâte au-dessous de la sonde n'excédera par $0^{m},006$.

On ne fera jamais deux essais sur la pâte contenue dans une même boîte.

L'Ingénieur ou son délégué déterminera en dernier ressort quelle est la proportion d'eau à admettre comme conséquence des tâtonnements effectués ainsi qu'il est dit ci-dessus.

Toutefois la proportion d'eau ainsi déterminée pourra sur la demande du fournisseur, être augmentée jusqu'à concurrence de 1 °/₀ au plus.

DURÉE DE LA PRISE

Article 9. — On déterminera sur la pâte normale de ciment pur, préparée comme il est dit à l'article 8, le *début* et la *fin de la prise.*

Immédiatement après sa confection, la pâte de ciment pur sera introduite avec les précautions indiquées au sixième paragraphe de l'article 8 dans une boîte semblable à celle qui est décrite au même paragraphe. Aussitôt le remplissage effectué et la surface du ciment dressée, la boîte sera immergée dans un bac contenant de l'eau dont la température sera maintenue

entre 16 et 18 degrés. La boîte ne sera extraite du bac que pendant le temps nécessaire pour chaque constatation.

On emploiera pour les essais de prise une aiguille en métal, dite *aiguille Vicat*, cylindrique, lisse, propre, sèche, terminée par une section nette et d'équerre d'un millimètre carré (diamètre 0m,0013, et pesant 300 grammes. Cette aiguille, suspendue par un fil passant sur une poulie, sera descendue normalement sur la pâte, lentement et avec précaution.

On considérera comme le *début de la prise* le moment où la masse ne se laissera plus pénétrer jusqu'au fond de la boîte.

La prise sera considérée comme terminée lorsque la surface de la pâte pourra supporter l'aiguille, sans que celle-ci y pénètre d'une quantité appréciable.

Les durées de prise seront comptées à partir du moment où l'eau de gâchage aura été mise en contact avec le ciment.

Si le ciment commence à prendre avant un délai de 30 minutes ou termine sa prise avant un délai de 3 heures, la fourniture partielle d'où provient l'échantillon sera *refusée*.

La fourniture partielle d'où provient l'échantillon sera également *refusée*, si la prise n'est pas terminée dans un délai de 12 heures.

ESSAIS DE DÉFORMATION A FROID

Article 10. — Immédiatement après le remplissage de la boîte métallique contenant la pâte destinée à l'essai de prise, on emploiera le reste de la gâchée pour former, en étalant la pâte sur des plaques de verre, des galettes circulaires de 0m,08 à 0m,10 de diamètre, ayant au centre 0m,02 environ d'épaisseur et amincies sur les bords.

Aussitôt après leur confection, on immergera les plaques de verre et les galettes qu'elles portent dans un bac rempli d'eau de mer dont la température sera maintenue entre 15° et 18°.

Si, avant la réception définitive, on remarque sur une quelconque des galettes des plissements ou crevasses ou si les bords de la galette se relèvent en se détachant de la plaque de verre,

la fourniture partielle d'où provient l'échantillon sera *refusée.*

ESSAIS DE DÉFORMATION A CHAUD

Article 11. — Pour les essais à chaud, on emploiera de petits moules cylindriques de $0^m,03$ de diamètre et $0^m,03$ de hauteur, confectionnés avee des feuilles de laiton 0^m0005 d'épaisseur, fendus suivant une génératrice et portant deux aiguilles rectilignes de $0^m,15$ de longueur perpendiculaires à l'axe du cylindre, soudées de part et d'autre de la fente et disposées l'une contre l'autre de manière à se toucher autant que possible sur toute leur longueur.

On remplira, avec la pâte normale de ciment pur provenant de chacune des gâchées faites pour la préparation des briquettes destinées aux essais de résistance, deux moules au moins, en prenant soin de maintenir les aiguilles au contact pendant le remplissage au moyen d'un étui de calage.

Les moules aussitôt remplis seront plongés dans un récipient contenant de l'eau douce à la température de 15° à 18°. Une fois la prise terminée et 24 heures au plus tard après le commencement du gâchage, on enlèvera les étuis de calage, on mesurera l'écartement des pointes des aiguilles, s'il y a lieu, et on élèvera la température de l'eau progressivement jusqu'à 100° dans un délai qui ne devra pas être de moins d'un quart d'heure ni de plus d'une demi-heure.

La température de 100° sera maintenue pendant 6 heures consécutives, puis on laissera refroidir jusqu'à la température initiale.

Dans le cas où l'écartement des pointes des aiguilles, mesuré au commencement et à la fin de l'opération, aurait augmenté de plus de $0^m,006$ pour l'un quelconque des moules, la fourniture partielle d'où proviendrait l'échantillon qui aurait donné ce résultat serait *refusée.*

Le *refus* serait également prononcé dans le cas où les cylindres en ciment présenteraient des fissures ou manifesteraient un commencement de désagrégation.

RÉSISTANCES A LA TRACTION DES BRIQUETTES CONFECTIONNÉES AVEC LA PATE DE CIMENT PUR.

Article 12. — La pâte de ciment pur destinée aux essais de résistance à la traction sera obtenue chaque fois en gâchant à la truelle, sur une plaque de marbre, 1 kilogramme de ciment conformément aux indications de l'article 8. Chaque gâchée donnera assez de pâte pour faire 6 briquettes et pour préparer au moins 2 éprouvettes destinées à l'essai à l'eau chaude prévu par l'article précédent.

a) MODE D'ÉXÉCUTION DES ESSAIS. — Chaque série d'essais devra comprendre la confection de 18 briquettes ; on aura ainsi à faire trois gâchées consécutives dans les mêmes conditions.

Les briquettes auront la forme représentée ci-contre en vraie grandeur, (*fig.* 66) avec une épaiseur de $0^m,0222$; la section de rupture sera de $0^m,0225$ sur $0^m,0222$.

Les moules présentant en creux la forme des briquettes seront placés sur une plaque de marbre ou de métal poli, disposée horizontalement sur un support bien fixe. Ils auront été préalablement, ainsi que la plaque, bien nettoyés et frottés d'un linge gras.

On remplira 6 moules d'une même gâchée en mettant du premier coup dans chaque moule assez de pâte pour qu'elle déborde. On enfoncera la pâte avec le doigt de manière à remplir complètement le moule sans laisser aucun vide, puis on frappera quelques coups de truelle sur les côtés du moule pour compléter le tassement et faciliter le dégagement des bulles d'air. Aussitôt que la consistance de la pâte le permettra, on dérasera la surface supérieure de la briquette en faisant glisser une lame de couteau bien droite et rigide presque horizontalement sur les bords du moule, de manière à enlever tout l'excédent de pâte sans exercer aucune compression. On achèvera de dresser la surface en y promenant le couteau toujours appuyé sur les bords.

Après un intervalle de temps au moins égal à la durée de la prise, préalablement constatée suivant les indications de l'ar-

ticle 9, on procèdera au démoulage. Pour cela, on commencera par faire glisser les moules sur la plaque, puis on les desserrera et on en éloignera les deux parties de la briquette en évitant de les soulever.

Pendant les 24 premières heures qui suivront le commencement du gâchage de la pâte, les briquettes seront conservées sur leur plaque dans une atmosphère saturée d'humidé, à l'abri des courants d'air et des rayons directs du soleil, à une température comprise autant que possible entre 15° et 18°.

Au bout de 24 heures, les briquettes seront immergées dans un bac rempli d'eau de mer.

L'eau du bac sera renouvelée tous les deux jours, si l'Ingénieur ne juge préférable de prescrire le renouvellement constant par circulation continue. La température de l'eau sera, autant que possible, maintenue constamment à une température comprise entre 15° et 18°.

Sur les 18 briquettes de pâte de ciment pur qui seront confectionnées dans les conditions indiquées ci-dessus pour chaque échantillon de ciment à essayer, 6 devront être rompues au bout de 7 jours, 6 au bout de 28 jours (4 semaines), 6 au bout de 84 jours (12 semaines), ces délais comptés à partir du moment du gâchage du mortier. Pour chaque série de ruptures, on prendra 2 briquettes de chaque gâchée.

Les briquettes seront rompues par extension au moyen de l'appareil à double levier en usage pour la rupture des briquettes de 5 centimètres carrés de section, appareil dans lequel le poids croissant qui produit la traction est obtenu par l'écoulement d'un jet de grains de plomb dans un vase suspendu à l'extrémité du second levier (*fig*. 73).

Parmi les 6 résultats obtenus dans chaque série, on éliminera les deux résultats les plus faibles ; la moyenne des quatre meilleurs résultats sera le chiffre admis pour la résistance de l'échantillon éprouvé au moment de l'essai.

b) Résultats exigés des briquettes de ciment pur. *Article 13.* — La résistance des briquettes de ciment pur, à l'expira-

tion du 7me jour, devra être au moins 20 kilogrammes par centimètre carré de la moindre section des briquettes d'essai.

Elle devra être d'au moins 35 kilogrammes par centimètre carré à l'expiration du 28me jour.

Toute fourniture partielle, d'où proviendrait un échantillon ne satisfaisant pas à ces deux conditions, *serait refusée.*

Article 14. — La résistance par centimètre carré des briquettes de ciment pur, constatée au bout de 28 jours, devra d'ailleurs dépasser d'au moins 5 kilogrammes celle qui aura été constatée au bout de 7 jours ; sinon, la fourniture partielle, d'où provient l'échantillon essayé, sera *déclarée suspecte.*

Article 15. — La résistance par centimètre carré des briquettes de ciment pur, constatée au bout de 84 jours, devra être d'au moins 45 kilogrammes.

De plus, elle devra dépasser la résistance constatée au bout de 28 jours quand celle-ci n'aura pas été d'au moins 55 kilogrammes.

Toute fourniture partielle, d'où proviendrait un échantillon qui ne satisferait pas à ces deux conditions, *serait refusée.*

ESSAIS AVEC MORTIER DE SABLE NORMAL.

Article 16. — Le sable à employer dans tous les essais sera fourni par l'Administration. Il sera obtenu par le tamisage de sable naturel provenant de la plage de Leucate (Aude).

a) Sable normal. — Le tamisage se fera successivement sur deux tamis en tôle perforée dont les trous auront, pour le premier, 0^{m},0015 et, pour le second, 0,001 de diamètre.

Les grains qui auront traversé le premier tamis et seront retenus sur le second, lavés à grande eau et séchés, constitueront le *sable normal.*

b) Confection des mortiers. — *Article 17.* — Le mortier de ciment et sable normal avec lequel seront faits les essais sera

composé d'une partie en poids de ciment sec pour trois parties en poids de sable normal sec; il sera gâché avec de l'eau de mer.

On opérera toujours sur 1 kilogramme de matières sèches, soit 250 grammes de ciment et 750 grammes de sable qu'on mélangera intimement à sec. On formera ensuite avec le mélange, sur la table de marbre, une couronne au centre de laquelle on versera d'un seul coup la quantité d'eau à employer, puis le mélange imprégné d'eau sera gâché fortement à la truelle pendant 5 minutes.

La quantité d'eau employée pour le gâchage sera de 45 grammes augmentés du 1/6e de la quantité d'eau nécessaire pour amener 1 kilogramme de ciment à l'état de pâte normale plastique suivant la méthode décrite à l'article 8.

Au moment du mélange, le ciment, le sable, l'eau et l'air ambiant seront à des températures comprises entre 15° et 18°.

RÉSISTANCE A LA TRACTION DES BRIQUETTES CONFECTIONNÉES AVEC LE MORTIER NORMAL

Article 18. — Chaque série d'essais devra comprendre la confection de 18 briquettes; on aura ainsi à faire trois gâchées consécutives dans les conditions indiquées à l'article 17, chaque gâchée fournissant la quantité de mortier nécessaire pour faire 6 briquettes, avec un certain excédent.

a) Mode d'exécution des essais. — Les moules à briquettes et l'appareil d'essai seront les mêmes que ceux qui doivent être employés pour les essais des pâtes de ciment pur, conformément aux indications de l'article 12 ci-dessus.

Les moules seront placés sur une plaque de marbre ou de métal poli disposée horizontalement sur un support bien fixe; ils auront été préalablement, ainsi que la plaque, bien nettoyés et frottés d'un linge gras.

On remplira 6 moules d'une même gâchée, en mettant du premier coup dans chaque moule assez de mortier pour qu'il déborde encore au-dessus du moule après le damage. On enfon-

cera le mortier avec le doigt de manière à remplir complètement le moule sans laisser aucun vide. Le mortier sera ensuite damé dans le moule avec une spatule en fer longue de $0^{m},35$, manche compris, présentant une surface de battage de $0^{m^2},0025$ et pesant 200 grammes. On procèdera d'abord par petits coups répétés sur le pourtour de la briquette, puis au centre ; on frappera ensuite plus énergiquement, en suivant toujours le même chemin et en continuant le damage jusqu'à ce que la masse commence à prendre un peu d'élasticité et que l'eau sue à la surface. On enlèvera ensuite l'excès du mortier avec une lame de couteau bien droite et rigide que l'on fera glisser presque horizontalement sur les bords du moule, et l'on achèvera de dresser la surface en promenant le couteau toujours appuyé sur les bords du moule.

Lorsque le mortier sera suffisamment durci, on procèdera au démoulage comme pour les briquettes de ciment pur.

Pendant les 24 premières heures qui suivront le commencement du gâchage du mortier, les briquettes seront conservées sur leur plaque dans une atmosphère saturée d'humidité, à l'abri des courants d'air et des rayons directs du soleil, à une température maintenue autant que possible entre 15° et 18°.

Au bout de 24 heures, on les immergera dans un bac rempli d'eau de mer.

L'eau des bacs contenant les briquettes sera renouvelée comme il est dit à l'article 12 et sera toujours maintenue autant que possible à une température comprise entre 15° et 18°.

Sur les 18 briquettes confectionnées avec chaque échantillon de ciment, 6 devront être rompues au bout de 7 jours, 6 au bout de 28 jours et 6 au bout de 84 jours, ces délais étant comptés à partir du moment du gâchage du mortier. Pour chaque série de ruptures, on prélèvera deux briquettes provenant de chacune des trois gâchées différentes.

Sur les 6 résultats obtenus dans chaque série, on éliminera les deux résultats les plus faibles ; la moyenne des quatre meilleurs résultats sera le chiffre admis pour la résistance du mortier éprouvé au moment de l'essai.

b) RÉSULTATS EXGIGÉS DES BRIQUETTES DE MORTIER NORMAL DE CIMENT ET SABLE. *Article 19.* — La résistance du mortier sableux normal à l'expiration du 7e jour devra être d'au moins 8 kilogrammes par centimètre carré de la moindre section des briquettes d'essai.

Elle devra être d'au moins 15 kilogrammes par centimètre carré à l'expiration du 28e jour.

Toute fourniture partielle, d'où proviendrait un échantillon ne satisfaisant pas à ces deux conditions, *serait refusée.*

Article 20. — La résistance par centimètre carré du mortier sableux normal, constatée au bout de 28 jours, devra d'ailleurs dépasser celle qui aura été constatée au bout de 7 jours, d'au moins 2 kilogrammes ; si non, la fourniture partielle, d'où provient l'échantillon essayé, *sera déclarée suspecte.*

Article 21. — La résistance par centimètre carré du mortier sableux normal, constatée au bout de 84 jours, devra être d'au moins 18 kilogrammes, et elle devra toujours dépasser la résistance constatée au bout de 28 jours.

Toute fourniture partielle, d'où proviendrait un échantillon ne satisfaisant pas à ces deux conditions, *serait refusée.*

SICCITÉ DES CIMENTS A LA SORTIE DU MAGASIN

Article 22. — Tout sac de ciment atteint par l'humidité au point que le contenu n'en soit plus franchement pulvérulent dans toutes ses parties au moment de la sortie du magasin pour emploi, sera refusé, même si l'ensemble de la fourniture est reçu.

MODE DE LIVRAISON

Article 23. — Le ciment sera livré en sacs pesant net 50 kilogrammes chacun.

Les sacs seront cousus en dedans et fermés par un scellement en plomb à la marque de l'Administration.

Les sacs devront être en parfait état au moment de la livraison. On refusera les ciments contenus dans des enveloppes qui présenteraient une déchirure ou dont la solidité ne serait pas complète.

L'expédition pourra en être faite par bateau ou par chemin de fer, aux risques et périls de l'entrepreneur.

A l'arrivée de chaque expédition et avant déchargement, les connaissements ou lettres de voiture seront communiqués à l'Ingénieur.

II. — RÈGLES ALLEMANDES POUR LA LIVRAISON ET L'EXAMEN UNIFORME DU CIMENT PORTLAND

Le ciment Portland est un produit formé par la cuisson d'un mélange intime de matériaux calcaires et argileux, les deux éléments essentiels, jusqu'à commencement de fusion, suivie de la réduction en poudre fine.

I. — EMBALLAGE ET POIDS

Ordinairement le ciment Portland doit être emballé dans des barils normaux de 180 kilogrammes brut et de 170 kilogrammes net, ou en demi-barils de 90 kilogrammes brut et de 83 kilogrammes net. Le poids doit être marqué sur les barils.

Si le ciment est emballé en barils d'un poids différent, ou en sacs, le poids brut doit aussi être marqué sur ces emballages en lettres bien lisibles.

Une perte par coulage, ainsi que quelques erreurs de poids jusqu'à 2 % ne peuvent donner lieu à des réclamations. Outre le poids, les barils et les sacs doivent aussi porter la marque de la fabrique.

EXPOSÉ DES MOTIFS I

Un poids uniforme est absolument nécessaire dans l'intérêt de l'acheteur et du commerce. Dans ce but, on a choisi le poids le plus usuel et presque exclusivement admis par le commerce international, de 180 kilogrammes brut = 400 livres anglaises.

II. — TEMPS DE PRISE

Selon le but de l'emploi il faut choisir le ciment Portland prenant lentement ou prenant promptement.

Comme prenant lentement, il faut désigner les ciments qui font prise après 2 heures au plus tard.

COMMENTAIRE II

Pour trouver le temps de prise d'un ciment, il faut gâcher celui à prise lente pendant 3 minutes, et celui à prise prompte pendant 1 minute, avec de l'eau jusqu'à consistance de pâte ; puis on forme, sur une plaque de verre, une galette de $1^{cm},5$ d'épaisseur, aux bords minces. La pâte employée pour cette galette doit être de consistance telle qu'elle ne s'étale vers les bords qu'après avoir frappé la plaque à plusieurs reprises ; une quantité d'eau de 27 à 30 °/₀ suffit généralement. Aussitôt que la masse a durci suffisamment pour résister à une légère pression de l'ongle, le ciment doit être considéré comme ayant fait prise.

Pour trouver le temps exact de prise et pour en déterminer le commencement (ce qui est important avec des ciments à prise prompte parce que le ciment doit être employé avant de commencer à durcir), on se sert d'une aiguille normale sans pointe du poids de 300 grammes et d'une section cylindrique de 1 millimètre carré. On remplit un cylindre ayant 4 centimètres de haut et 8 centimètres de diamètre intérieur, mis sur une plaque de verre, de la pâte à ciment, de la consistance indiquée ci-dessus, et on y applique l'aiguille ; le moment où celle-ci ne peut plus pénétrer la pâte de ciment doit être considéré comme le commencement de la prise ; le temps qui s'écoule jusqu'au

moment où l'aiguille n'y fait plus d'empreinte visible est le « temps de prise ».

Comme la prise dépend de la température de l'air et de l'eau employée, une température élevée l'accélérant, et une température basse la retardant, il est nécessaire de faire les essais à une température moyenne de 15 — 18° C., de l'eau ainsi que de l'air, pour obtenir des résultats uniformes.

Le ciment à prise lente ne doit pas s'échauffer sensiblement pendant la prise ; celui à prise prompte peut montrer une élévation sensible de température.

Le ciment Portland acquiert, par une conservation prolongée en magasin, la faculté de prendre lentement, et s'il est à l'abri des courants d'air et de l'humidité, il gagne en résistance. L'opinion encore prédominante, qu'il perd de sa qualité par un magasinage prolongé, est donc une erreur et les conditions stipulant que le ciment soit frais ne devraient plus figurer dans les contrats.

III. — STABILITÉ DE VOLUME

Le ciment Portland doit être stable de volume. On admet comme épreuve décisive l'examen d'une galette de ciment pur, préparée sur une plaque de verre et à l'abri de la dessiccation, mise sous l'eau 24 heures après sa confection ; cette galette ne doit pas montrer, par la suite, de fissures ou de crevasses sur les bords.

COMMENTAIRE III

Pour faire l'essai, la pâte, préparée pour déterminer le temps de prise, est mise sous l'eau, quand le ciment est à prise lente, après 24 heures, et dans tous les cas après la prise faite. Avec du ciment à prise prompte, il n'est pas besoin d'attendre aussi longtemps. Il faut mettre les galettes, surtout celles de ciment à prise lente, jusqu'à ce que la prise soit faite, à l'abri des courants d'air, et du soleil, en les plaçant dans une caisse couverte ou sous des linges humides. De cette manière, on évite la formation de crevasses qui d'ordinaire se forment au milieu des galettes et qui sont prises pour des crevasses de gonflement par ceux qui ne sont pas expérimentés. Si des fissures ou des

crevasses se produisent pendant le durcissement sous l'eau, cela indique certainement un mouvement du ciment ; c'est-à-dire que par suite d'une augmentation de volume il se forme des fentes et en même temps le ciment commence à se détruire, en perdant peu à peu de sa cohésion, ce qui peut mener à sa décomposition totale.

Le mouvement du ciment se manifeste généralement après 3 jours ; il suffit de l'observer pendant 28 jours.

IV. — FINESSE DE MOUTURE

Le ciment Portland doit être moulu assez finement pour que l'épreuve faite au tamis de 900 mailles par centimètre carré, donne 10% de résidu au maximum. L'épaisseur du fil du tamis doit être de la moitié de la largeur des mailles.

COMMENTAIRE IV

Pour chaque essai de tamisage, il faut prendre 100 grammes de ciment. Le ciment étant presque toujours employé avec un mélange de sable, souvent même avec une forte proportion de ce dernier, et la résistance d'un mortier étant d'autant plus grande que le ciment est plus finement moulu, (parce qu'un plus grand nombre de molécules entrent alors en action), la finesse de mouture est d'une grande importance. Il est donc nécessaire de faire l'épreuve ci-dessus.

Cependant ce serait une erreur de juger de la qualité d'un ciment seulement par la finesse de son grain, parce que les ciments tendres, de qualité inférieure, sont souvent plus finement moulus que les ciments de qualité supérieure fortement cuits. Généralement ces derniers présenteront, même plus grossièrement moulus, une plus grande force de liaison que les premiers. Quand on veut employer un mélange de ciment et de chaux, il vaut mieux prendre un ciment fortement cuit, de mouture très fine, dont les frais plus élevés de fabrication sont compensés par l'amélioration sensible de la qualité du mortier.

V. — ESSAIS DE RÉSISTANCE

On trouve la force de liaison du ciment Portland en soumettant à l'épreuve un mélange de ciment et de sable. Il faut faire les essais de résistance à la traction et à la compression d'après une méthode uniforme, c'est-à-dire avec des éprouvettes de la même forme, de la même section et avec les mêmes appareils.

Il est aussi indiqué de déterminer la résistance du ciment gâché pur, sans mélange.

Les essais de résistance à la traction doivent être faits avec des éprouvettes de 5 centimètres carrés de section et les essais de résistance à la compression avec des cubes de 50 centimètres carrés de surface.

COMMENTAIRE V

Comme les épreuves de résistance faites avec du ciment pur ne suffisent pas pour pouvoir juger de la force de liaison avec du sable, surtout quand on doit comparer diverses marques, il est nécessaire de faire des épreuves avec du ciment mêlé de sable.

L'examen du ciment pur doit surtout se faire dans des cas où il s'agit de comparer le ciment Portland aux ciments mélangés et à d'autres produits hydrauliques, parce que la résistance intrinsèque fait mieux apprécier la qualité supérieure et les qualités spéciales du ciment Portland que les essais avec sable.

Bien que le rapport de la résistance à la compression à celle à la traction varie avec les divers produits hydrauliques, on juge souvent par la résistance à la traction la valeur des divers agglomérants. Mais on a ainsi des résultats erronés. Comme, en pratique, la résistance à la compression des mortiers à une importance capitale, l'épreuve à la compression peut être la seule décisive.

Pour assurer l'uniformité des essais, on conseille d'employer des appareils et des ustensiles semblables à ceux dont on se sert à la station d'essai à Charlottenbourg-Berlin.

VI. — RÉSISTANCE A LA TRACTION ET A LA COMPRESSION

Dans l'épreuve du mortier de ciment Portland à prise lente, se composant d'une partie de ciment, pour trois de sable normal en poids, après 28 jours de durcissement, 1 jour à l'air et 27 jours sous l'eau, la résistance minima à la traction doit être de 16 kilogrammes par centimètre carré. La résistance à la compression doit être au moins de 160 kilogrammes par centimètre carré.

Le ciment à prise prompte donne, après 28 jours, généralement une résistance un peu plus faible que celle indiquée ci-dessus. Il faut donc, en donnant les chiffres des résistances, citer aussi le temps de prise.

COMMENTAIRE VI

Les diverses marques de ciment montrent souvent de grandes différences de résistance avec mélange de sable, ce qui, en pratique, est d'une importance capitale, l'essai avec une forte proportion de sable est donc absolument nécessaire. On considère que la proportion de 3 parties en poids de sable, pour une partie de ciment montre suffisamment la force de liaison avec le sable.

Le ciment qui présente une plus grande résistance à la traction ainsi qu'à la compression permet, en beaucoup de cas, d'employer une plus grande proportion de sable, et à ce point de vue, ainsi qu'à cause de sa résistance plus grande, il a droit, à dosage égal, à un prix plus élevé.

La période de résistance est déterminée par l'essai de compression après 28 jours, car la force de liaison ne peut pas être bien reconnue en un temps plus court, quand on compare diverses marques de ciment. Ainsi les résultats peuvent être semblables après 28 jours tandis qu'après 7 jours il y aura peut-être une différence sensible.

L'épreuve décisive pour la marchandise livrée est l'essai après 28 jours. Si cependant on veut faire l'épreuve déjà après 7 jours, on pourra faire un examen provisoire pourvu que l'on connaisse le rapport de la résistance à 7 jours à celle

à 28 jours pour le ciment en question. Egalement, cet essai provisoire peut être fait avec du ciment pur si on a déterminé le rapport de la résistance du ciment pur à celle du mélange 1,3 après 28 jours.

Il est prudent de prolonger, quand c'est possible, l'examen des résistances pendant un certain temps avec des éprouvettes préparées dans ce but, pour savoir comment les diverses qualités se comportent pendant une période de durcissement de longue durée.

Pour arriver à des résultats uniformes il faut employer un sable d'un grain régulier et toujours semblable.

Ce sable normal est obtenu comme suit : On prend du sable de quartz, le plus fin possible ; il est lavé, séché, passé au tamis de 60 mailles par centimètre carré qui élimine les parties trop grosses, puis enfin passé au tamis de 120 mailles qui élimine les parties trop fines. L'épaisseur des fils des tamis doit être respectivement de $0^{mm},38$ et $0^{mm},32$.

Tous les sables de quartz donnent, à traitement égal, la même résistance ; il faut s'assurer si le sable dont on dispose donne les mêmes résultats que ceux du sable normal essayé par le Comité de l'Union des fabricants allemands de ciment Portland, et aussi celui employé à la station d'essai de Charlottenbourg-Berlin.

Comme il est important que l'examen d'un même ciment, en différents endroits, donne les mêmes résultats, il faut particulièrement faire attention à ce que les règles ci-dessous soient exactement suivies.

Pour avoir des chiffres moyens convenables il faut préparer 10 pièces d'essai au moins.

PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES DE CIMENT ET SABLE. ÉPREUVES A LA TRACTION

Les pièces d'essai sont préparées à la main ou à la machine.

a) Préparation à la main : On met sur une plaque de métal ou de verre épais 5 feuilles de papier buvard humides et par dessus 5 moules également humectés. On prend alors 250

grammes de ciment et 750 grammes de sable normal et on les mélange intimement dans une cuvette. Puis on y ajoute 100^{cm^3} = 100 grammes d'eau douce ; on travaille le tout pendant cinq minutes et on remplit alors les moules d'un seul coup et en comprimant le mortier de manière à obtenir une surface fortement bombée. En frappant ensuite les moules à l'aide d'une spatule en fer (de 5 : 8 centimètres carrés de surface, 35 centimètres de longueur et d'un poids de 250 grammes), on tasse le mortier dans le moule jusqu'à ce qu'il devienne élastique et que l'eau ressorte à la surface. Pour obtenir ce résultat, il faut frapper le moule pendant une minute au moins ; il n'est pas bon de remplir le moule en plusieurs fois parce que l'éprouvette doit avoir partout la même densité. On racle alors le moule avec un couteau et on lisse la surface. Puis on enlève les éprouvettes du moule avec précaution et on les place dans une caisse à couvercle, garnie de zinc, pour éviter une dessiccation inégale à une température variable. 24 heures après leur préparation, on met les éprouvettes dans l'eau, en ayant soin qu'elles soient bien couvertes par l'eau pendant tout le temps de leur durcissement.

b) Préparation à la machine : Le moule, pourvu de l'appareil de remplissage, étant attaché à la plaque de couche avec 2 vis, on le remplit, pour chaque éprouvette, d'un mortier préparé comme en *a*) et on place le pilon. Puis on donne sur ce dernier, à l'aide de l'appareil de M. Böhme, 150 coups de marteau de 2 kilogrammes. Après enlèvement de l'appareil de remplissage et du pilon, l'éprouvette est raclée et lissée, retirée de la plaque et, pour le reste, traitée comme en *a*.

En suivant exactement ces règles, on obtient, aussi bien à la main qu'à la machine, des résultats bien uniformes.

ÉPREUVES DE COMPRESSION

Pour obtenir des résultats uniformes des épreuves de compression, faites en différents endroits, la préparation à la machine est nécessaire.

On mêle 400 grammes de ciment et 1 200 grammes de sable normal intimement dans une cuvette, on ajoute 160 centimètres

cubes = 160 grammes d'eau et on travaille bien la pâte pendant 5 minutes, de ce mortier on verse 860 grammes dans un moule à forme cubique, attaché par des vis sur sa plaque de couche. Puis on place le pilon en fer et on donne 150 coups à l'aide de l'appareil de M. Böhme du marteau pesant 2 kilogrammes. On enlève ensuite le pilon et l'appareil de remplissage, l'éprouvette est raclée, lissée, enlevée de la plaque et traitée pour le reste comme en *a*.

PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES DE CIMENT PUR

On huile l'intérieur des moules et on les place sur une plaque de métal ou de verre (sans papier buvard). Puis on gâche 1 000 grammes de ciment pur avec 200 centimètres cubes = 200 grammes d'eau, on travaille le tout pendant 5 minutes à l'aide d'un pilon, on remplit les moules et on procède comme en *a*. On ne peut cependant détacher les éprouvettes des moules qu'après un durcissement suffisant.

Comme avec le ciment pur les éprouvettes doivent avoir une densité égale, il faut augmenter la quantité d'eau, quand le ciment est très fin ou à prise prompte.

La quantité d'eau est toujours à indiquer en donnant les chiffres de résistance.

TRAITEMENT DES ÉPROUVETTES AU MOMENT DE L'ESSAI

Tous les échantillons sont soumis à l'essai immédiatement après être sortis de l'eau. La durée de l'épreuve ayant de l'influence sur le résultat, il faut, en faisant l'épreuve de traction, faire agir la charge à raison de 100 grammes par seconde.

A l'épreuve de compression, il faut, pour obtenir des résultats uniformes, exercer la pression sur des faces latérales des cubes et non sur les bases, c'est-à-dire sur les surfaces pilonnées.

La moyenne de deux essais doit être considérée comme la résistance normale dans l'un et l'autre cas.

TABLEAU N° I

Résistance à la traction et à la compression des mortiers de chaux hydrauliques

Première série. — Essais faits avec la chaux du Teil (Poids du litre : 800 *gr. — Résidu sur le tamis de* 324 *m.* : 0,5 °/₀. — *Sur le tamis de* 900 *m.* : 8 °/₀. — *Sur le tamis de* 5000 *m.* : 19 °/₀).

Composition des mortiers pour 1 m³ de sable (1 300 k.) chaux =	Quantité d'eau de gâchage pour 100 k. de mortier	Résistance par centimètre carré — à la traction: 7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	à la compression: 7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4ans
1° *Sable normal. — Mortiers comprimés. — Éprouvettes conservées dans l'eau.*																	
k.	l.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.
250	11	1,6	4,7	8,4	9,7	15,0	13,5	16,5	15,4	14,0	24,7	40,3	63,7	73,7	75,0	75,0	66,7
350	12	1,7	6,4	10,7	18,2	19,5	17,2	17,9	19,5	17,3	38,9	68,3	99,0	113,3	121,7	111,7	118,3
450	13	2,5	7,0	14,0	19,7	23,4	20,0	24,0	25,1	23,7	37,0	80,3	131,7	151,7	155,0	148,3	140,0
550	14	2,6	6,4	13,2	22,1	25,4	22,4	23,7	23,4	20,3	43,7	80,0	105,0	153,3	150,7	158,3	145,0
650	15	3,0	7,9	17,9	20,7	26,1	23,5	23,6	26,0	22,0	45,3	81,7	118,3	150,0	155,0	171,7	161,7
2° *Sable normal. — Mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier. Éprouvettes conservées dans l'eau.*																	
350	20	»	2,9	7,4	11,2	13,7	15,4	14,0	12,7	»	10,5	28,7	42,0	43,7	65,0	62,0	73,3
550	24	»	3,7	7,2	12,5	15,4	16,6	16,6	17,9	»	18,7	27,0	61,7	73,3	85,0	91,7	88,3
3° *Sable naturel pris sur un chantier, siliceux, à angles vifs. — Poids du litre* 1500 *gr. Vide* 424 *cc.) Mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier.*																	
250	14,3	»	»	»	»	»	»	»	»	»	15,3	28,7	48,7	48,3	44,0	45,3	
350	16,2	»	»	»	»	»	»	»	»	»	22,0	34,0	63,3	65,0	61,7	78,5	
450	18,4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	20,3	47,0	70,0	71,7	70,0	75,0	
4° *Sable fin des Dunes (Poids du litre* 1435 *gr. — Vide* 455 *cc.) — Mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier.*																	
250	21	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	12,0	12,0	13,7	17,0	
350	20,5	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	13,0	20,3	20,3	30,3	28,2	
450	21,5	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	17,0	35,3	35,3	36,2	42,0	

TABLEAU N° I (Suite)

Deuxième série. — Essais faits sur des chaux hydrauliques de diverses provenances. — Sable normal. Mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier. Éprouvettes conservées dans l'eau et à l'air.

Désignation des chaux	Composition du mortier pour 1m³ de sable (1 300 k.) chaux =	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré — à la traction — 7 jours	28 jours	3 mois	1 an	à la compression — 7 jours	28 jours	3 mois	1 an	Mode de conservation des éprouvettes
	k.	l.		k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	
1° *Chaux du Teil* :	250	15	1,97	0,0	3,4	6,7	12,0	0,0	12,0	18,7	45,0	éprouvettes conservées dans l'eau
Poids du litre : 800 gr.	350	16	2,03	0,0	5,0	8,7	16,0	0,0	20,3	32,0	81,7	
Résidu : 324 m.: 0	450	17,5	2,07	3,0	5,1	9,7	19,7	0,0	22,0	42,0	118,3	
— 900 m.: 8,5	250	15	1,97	0,0	5,4	10,9	15,1	0,0	12,0	17,0	66,7	éprouvettes conservées à l'air
— 5000 m.: 20,0	350	16	2,03	0,0	7,1	15,7	25,0	0,0	20,3	30,3	96,7	
	450	17,5	2,07	3,4	9,1	19,2	27,7	12,0	22,0	32,0	78,3	
2° *Chaux de Beffes* :	250	18,5	1,98	0,0	3,7	8,0	11,0	0,0	0,0	17,0	40,3	à l'eau
Poids du litre : 550 gr.	350	20,5	2,00	0,0	4,6	9,4	12,5	0,0	0,0	22,0	52,0	
Résidu : 334 m.: 3,5	450	23,5	1,98	0,0	4,0	8,7	12,4	0,0	0,0	25,3	65,0	
— 900 m.: 5,5	250	18,5	1,98	0,0	4,9	9,6	11,1	0,0	0,0	12,5	25,5	à l'air
— 5000 m.: 9,0	350	20,5	2,00	0,0	4,5	5,6	10,1	0,0	0,0	19,5	45,3	
	450	23,5	1,98	0,0	5,2	10,9	10,9	0,0	0,0	20,0	51,7	
3° *Chaux de Tournai* :	250	16,5	2,00	0,0	2,7	5,0	8,2	0,0	0,0	17,8	32,0	à l'eau
Poids du litre : 450 gr.	350	19,5	2,00	0,0	3,2	6,7	10,5	0,0	0,0	24,7	40,3	
Résidu : 334 m.: 0	450	23,0	1,95	0,0	3,5	5,2	9,7	0,0	12,0	21,8	41,3	
— 900 m.: 2	250	16,5	2,00	0,0	4,6	6,9	7,2	0,0	0,0	12,6	28,7	à l'air
— 5000 m.: 7	350	19,3	2,00	0.0	5,0	7,9	10,1	0,0	0,0	16,3	37,0	
	450	23,0	1,95	0.0	4.1	6,5	9,2	0,0	0,0	17,0	38,7	

GRAPHIQUE N° 1

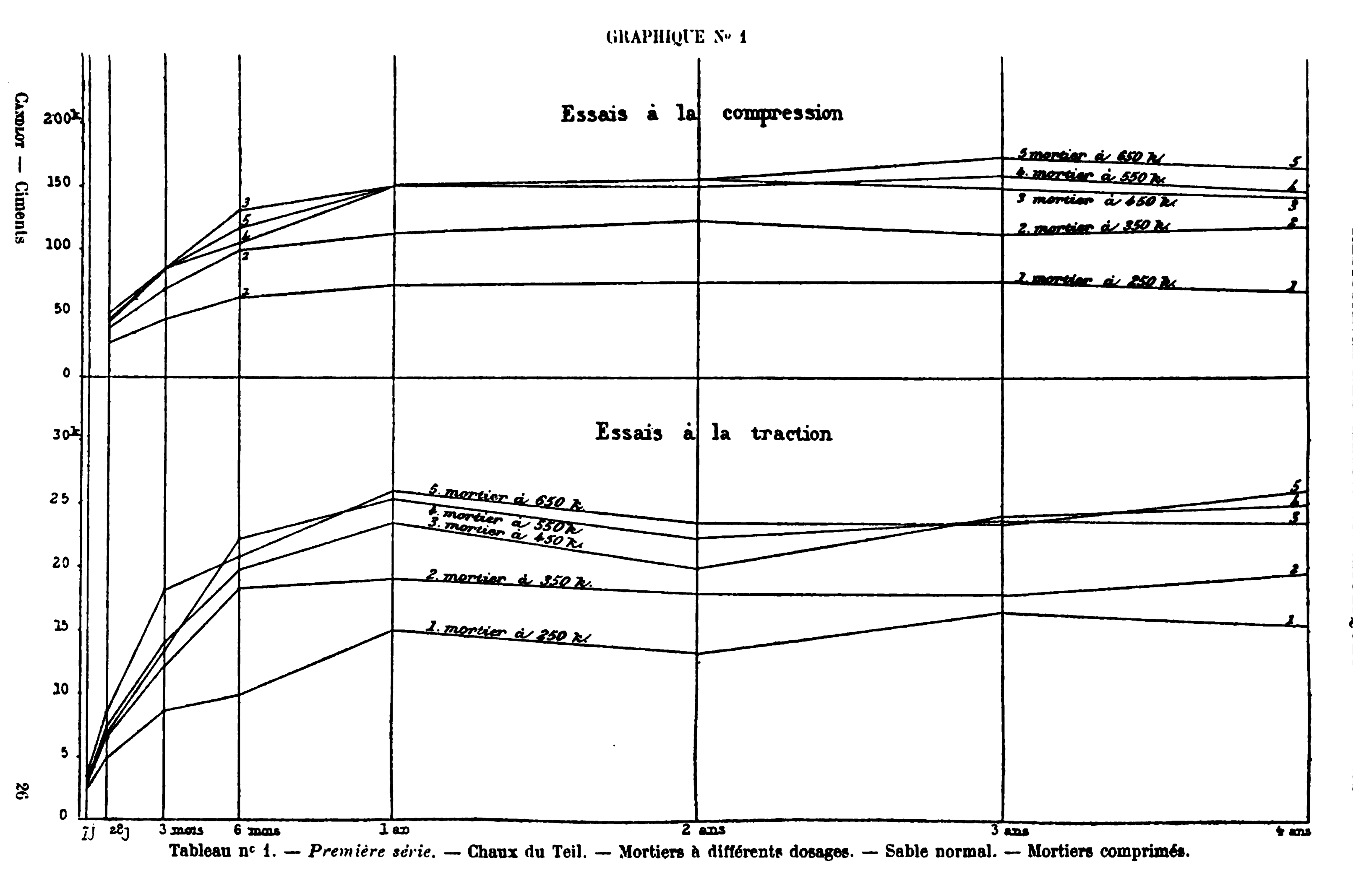


Tableau n° 1. — *Première série.* — Chaux du Teil. — Mortiers à différents dosages. — Sable normal. — Mortiers comprimés.

TABLEAU N° II

Densités et résidus

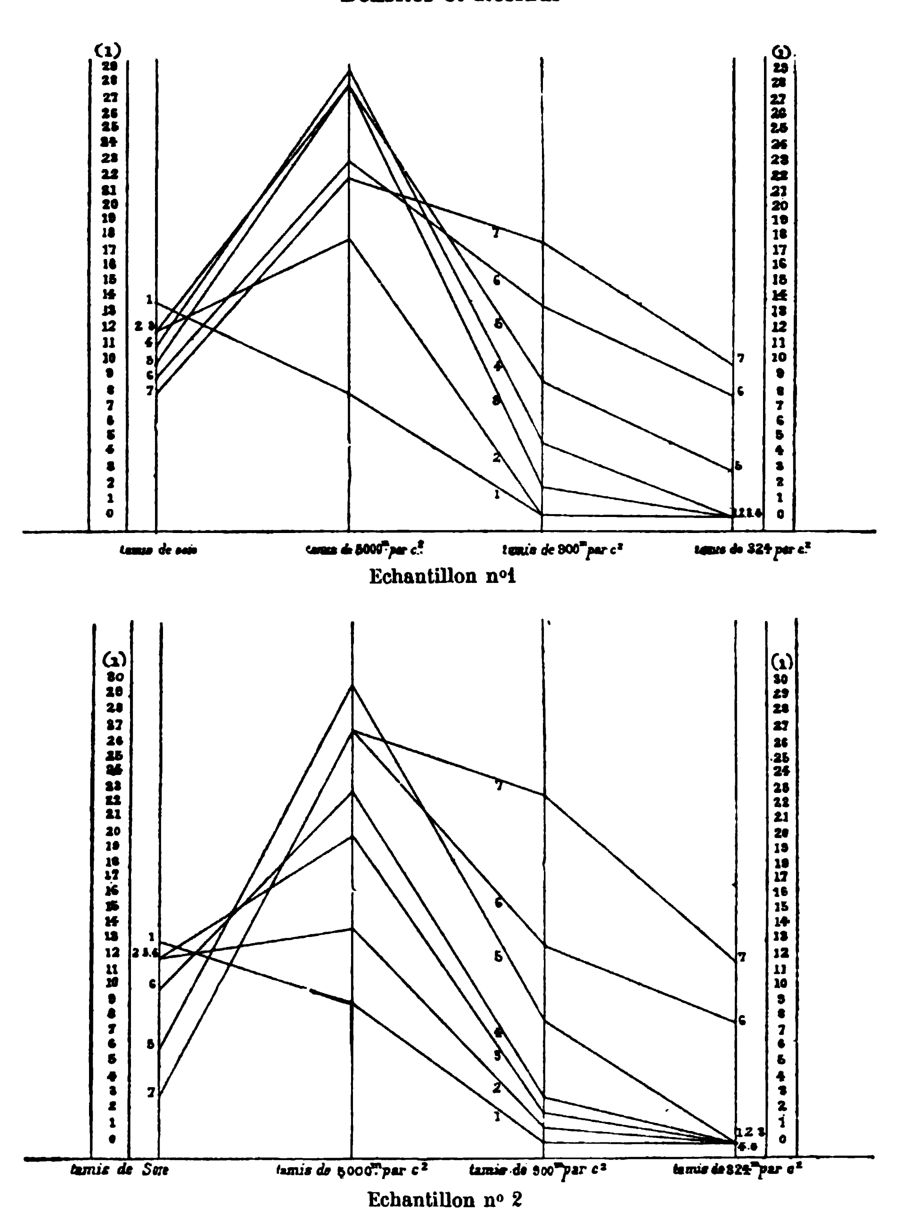
	Résidu au tamis de : 324m	900m	4900m	soie	Densité
N° 1 Moyenne d'un grand nombre d'essais faits pendant plusieurs années sur des ciments fabriqués de la même façon.	0	0	8	22	1100gr
	0	0	18	30	1145
	0	2	30	42	1250
	0	5	34	45	1290
	3	12	40	50	1340
	8	22	45	54	1380
	10	28	50	58	1450
N° 2 Résultats obtenus sur un seul échantillon de roches. Le ciment a été bluté au sortir de la meule.	0	0	9	22	1095
	0	1	15	27	1125
	0	2	22	34	1210
	0	3	26	38	1230
	0	8	38	44	1290
	8	21	48	58	1445
	12	35	62	65	1510
N° 3 Résultats obtenus sur un seul échantillon de roches. Ce ciment n'a pas été bluté au sortir de la meule.	0,5	1,5	14	33	1155
	1	3	21	39	1190
	1,5	4,5	30	46	1270
	1,5	6	35	48	1300
	4	13	43	55	1365
	17	34	54	66	1445
	24	38	57	67	1495
N° 4 Résultats obtenus sur un même échantillon de roches auxquelles on avait mélangé 20 $^0/_0$ de poussières lourdes. Les échantillons ont été pris à la sortie de la meule.	0	1	7	20	1080
	0	1	10	20	1090
	1	2	15	27	1120
	2	4,5	20	32	1165
	5	11	30	46	1280
	9	17	34	48	1285
	12	22	40	50	1320
	19	32	49	60	1390

TABLEAU N° III
Densités et résidus

	Classification des grains d'après leur volume				
	Quantité restant sur le tamis de 324m	Quantité restant sur le tamis de 900m et ayant traversé le tamis de 324m	Quantité restant sur le tamis de 4900m et ayant traversé le tamis de 900m	Quantité restant sur le tamis de soie et ayant traversé le tamis de 4900m	Quantité passant à travers le tamis de soie
N° 1.	0	0	8	14	78
	0	0	18	12	70
	0	2	28	12	58
	0	5	29	11	55
	3	9	18	10	50
	8	14	23	9	46
	10	18	22	8	42
N° 2.	0	0	9	13	78
	0	1	14	12	73
	0	2	20	12	66
	0	3	23	12	62
	0	8	30	6	56
	8	13	27	10	42
	12	23	27	3	35
N° 3.	0,5	1	12,5	19	67
	1	2	18	18	61
	1,5	3	25,5	16	54
	1,5	4,5	29	13	52
	4	9	30	12	45
	17	17	20	12	34
	24	14	19	10	33
N° 4.	0	1	6	13	80
	0	1	9	10	80
	1	1	13	12	73
	2	2,5	15,5	12	68
	5	6	19	16	54
	9	8	17	14	52
	12	0	18	10	50
	19	13	17	11	40

GRAPHIQUES DU TABLEAU N° 3

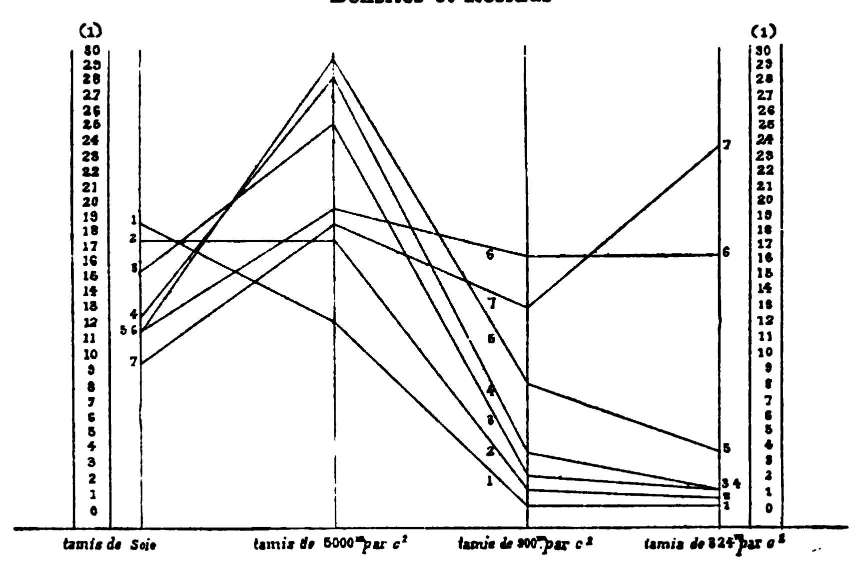
Densités et Résidus



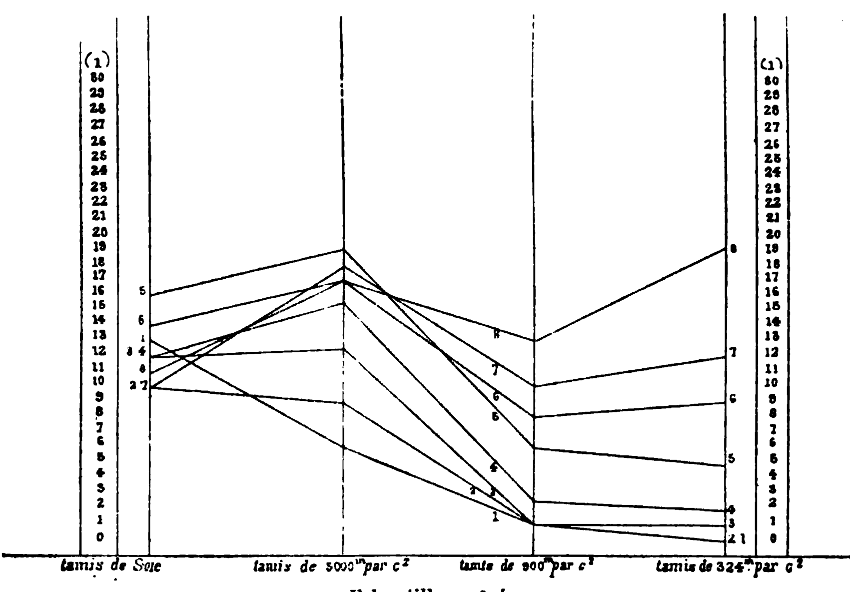
(1) Chiffres indiquant pour 100 de ciment les quantités de grains restant sur un tamis après élimination des grains refusés par le tamis précédent.

GRAPHIQUES DU TABLEAU N° 3


Densités et Résidus



Echantillon n° 3



Echantillon n° 4

TABLEAU N° IV

Densités et Résidus

	Ciment de première qualité			Ciment de deuxième qualité			Ciment de première qualité	
	Résidu au tamis de 4900m	Densité		Résidu au tamis de 4900m	Densité		Résidu au tamis de 4900m	Densité
N° 1	0	1,120gr	N° 2	0	1,100gr	N° 3	0	990gr
	10	1,180		10	1,170		10	1,035
	15	1,220		20	1,210		15	1,075
	20	1,240		30	1.260		20	1,090
	25	1,280		40	1,310		25	1,120
	30	1,300		50	1,370		30	1,150
	35	1,310					35	1,195
	40	1,345					40	1,270
	45	1,365					45	1,275
	50	1,400					50	1,290

TABLEAU N° V

Densités des ciments passés au tamis de 4900 mailles

Résidu au tamis de 900m	Résidu au tamis de 4900m	Densité du ciment initial	Densité du ciment passé au tamis de 4900m	Résidu au tamis de 900m	Résidu au tamis de 4900m	Densité du ciment initial	Densité du ciment passé au tamis de 4900m
				2	28	1.320gr	1,100gr
Ciments de première qualité				2	28	1.305	1,160
				2	26	1,260	1,100
				2	18	1,185	1,075
20	46	1,370gr	1,046gr	1	14	1,160	1,070
19	46	1.385	1,120	1	12	1,135	1,005
18	46	1,380	1.110	1	20	1,190	1.055
19	45	1,380	1.095	1	28	1,200	1,015
12	36	1,330	1,060				
11	38	1,340	1,020				
10	35	1,340	1,055	Ciments de deuxième qualité			
10	42	1,375	1,015				
10	34	1,285	1.005				
9	36	1,310	1,055	18	40	1,245	940
7	32	1,320	1,015	18	42	1,275	995
6	36	1,370	1,150	14	42	1.295	975
6	33	1,345	1,030	12	40	1,310	955
6	36	1,370	1,020	10	35	1.220	945
5	35	1,340	1,065	11	35	1,215	1,000
5	37	1,300	1,015	10	32	1.150	955
4	31	1,275	1,040	13	32	1,200	990
4	36	1,310	1,065	12	38	1,255	930
4	30	1,260	1,030	4	30	1,145	955
4	29	1.230	1,060	4	20	1,115	995
3	30	1,305	1.130	7	28	1,075	865

TABLEAU N° VI

Prise des ciments à l'eau douce

Numéros d'ordre	Ciment à 15° gâché avec de l'eau à	Prise	Eau à 15° Ciment à	Prise	Eau et ciment à la même température	Prise	Quantité d'eau de gâchage	Prise	Mortiers	Prise
		h. '		h. '		h. '		h. '		h. '
N° 1.	1°	1,10	11°	24	6°	1,00	24 %	20	1 partie ciment	30
	8	44	16	18	15	25	26	30	1 de gravier	
	16	40	21	15	20	10	28	43	1 partie ciment	45
	24	20	26	14	25	4	30	47	3 de gravier	
	32	10	31	9	30	immé-	32	48	1 partie ciment	2,00
	36	7	36	4	»	diate	34	1,15	5 de gravier	
N° 2.	1	4,50	9	5,12	7	5,50	21	2,20	1 = 1	4,50
	8	4,45	14	5,00	15	5,00	23	3,30		
	16	4,25	19	4,35	20	4,55	25	4,10	1 = 3	5,30
	28	4,15	24	5,30	25	4,00	27	5,00		
	32	3,10	29	4,20	30	3,10	29	5,50	1 = 5	6,00
	40	3,00	39	4,00	»	»	»	»		
N° 3.	1	27	8	35	6	40	26	15	1 : 1	43
	7	26	13	28	15	20	28	17		
	14	19	20	30	20	12	30	20	1 : 3	1,00
	21	18	27	30	25	6	32	22		
	28	15	34	25	30	immé-	34	25	1 : 5	1,10
	35	10	41	27	»	diate	»	»		
	42	8	»	»	»	»	»	»		
N° 4.	6	40	6	35	9	30	25	7	1 : 1	40
	13	38	13	35	15	28	27	18		
	20	21	20	16	20	9	29	25	1 : 3	2,30
	27	14	27	15	25	8	31	34		
	34	9	34	13	30	4	33	35	1 : 5	3,00
	41	4	41	6	»	»	35	45		
N° 5.	1	2,55	9	1,55	»	»	24	40	1 : 1	2,10
	6	2,37	16	1,48	»	»	26	1,55		
	13	2,15	23	1,37	»	»	28	2,30	1 : 3	2,47
	20	1,23	30	1,30	»	»	30	3,00		
	27	1,15	37	1,20	»	»	32	3,30	1 : 5	3,50
	34	16	»	»	»	»	»	»		
	41	14	»	»	»	»	»	»		

TABLEAU N° VI (*suite*)

Numéros d'ordre	Eau et ciment à la même température	Prise	Quantité d'eau de gâchage	Prise	Mortiers	Prise
		h. '		h. '		h. '
N° 6	8°	27	24 %	5	1 : 1	25
	15	10	26	8		
	20	7	28	20	1 : 3	45
	25	5	30	35		
	30	immé-	32	42	1 : 5	3,00
	»	diate	34	45		
N° 7	6	28	25	15	1 : 1	1,45
	20	10	27	22		
	25	9	29	27	1 : 3	2,00
	30	8	31	32		
	»	»	33	44	1 : 5	2,30
	»	»	35	1,00		
N° 8	7	4,00	24	2,10	1 : 1	4,30
	15	3,00	26	3,00		
	20	2,18	28	3,10	1 : 3	5,00
	25	25	30	5,15		
	30	10	32	5,00	1 : 5	6,45
	35	immé-diate	»	»		
N° 9	9	2,20	24	1,00	1 : 1	2,20
	15	1,10	26	1,20		
	20	20	28	1,37	1 : 3	4,00
	25	8	30	2,30		
	30	immé-	32	3,15	1 : 5	4,50
	»	diate	34	4,00		
N° 10 (Ciment artificiel à prise prompte)	9	12	24	3	1 : 1	8
	20	5	26	5		
	25	4	28	7	1 : 3	10
	30	3	30	10		
	»	»	32	14	1 : 5	13

TABLEAU N° VII

Essais de prises à l'eau douce et à l'eau de mer

N° d'ordre des échantillons	Date de l'essai	Ciment conservé en baril: Poids du litre non tassé	Ciment conservé en baril: Quantité d'eau de gâchage	Ciment conservé en baril: Durée de prise, eau douce	Ciment conservé en baril: Durée de prise, eau de mer	Ciment conservé en sac: Poids du litre non tassé	Ciment conservé en sac: Quantité d'eau de gâchage	Ciment conservé en sac: Durée de prise, eau douce	Ciment conservé en sac: Durée de prise, eau de mer
				h.	h.			h.	h.
1	22 décembre	1200	26	40	4.50	1185	26	20	5,00
	12 décembre	1165	27	14	1,40	1210	28	26	6,50
	12 janvier	1150	27	18	1,35	1185	29	3,25	10,25
	9 février	1175	26	30	1,50	1170	26	15,00	12,00
	11 mars	1195	28	55	1,50	1175	28	13,00	13,00
	30 mars	1160	28	5.35	16,00	1170	30	15,00	16,00
	15 avril	1125	28	8,40	9,00	1110	31	16,00	16,00
	23 avril	1085	28	9,00	10,00	1065	32	»	16,00
2	16 mai	1230	24,5	23	1,40	1230	24	17	30
	28 mai	1200	25	20	1,30	1180	25	40	3,10
	15 juin	1180	26,5	20	45	1170	27,5	25	1,10
	2 juillet	1160	27	1,50	3,40	1160	29	55	3,20
	18 juillet	1130	27	6,00	6,35	1100	28	3,00	4,50
	30 juillet	1160	29	4,00	5,00	1145	29	2.50	5,40
	15 août	1150	26	4,00	5,00	1150	30	3,25	4,45
	7 septembre	1140	27	4,50	5,10	1090	30	3,50	5,45
3	8 mai	1210	26	13	20	1220	26	14	20
	25 juin	1155	26	14	20	1150	26,5	14	25
	15 juin	1115	26	4,00	5,15	1125	28	2,50	5,35
	5 juillet	1100	27	4.50	5,00	1090	27	3,20	4,35
	20 juillet	1060	30	1,50	4,10	1040	28	4,30	6,00
	1er août	1110	28	3,00	5,00	1095	30	1,00	3,00
	17 août	1100	28	4,20	4,55	1040	31	3,50	5,45
	7 septembre	1090	29	3,25	5,20	1040	31	2,45	6,10

Ciments conservés en sacs

N° d'ordre des échantillons	Date de l'essai	Durée de prise: eau douce	Durée de prise: eau de mer	N° d'ordre des échantillons	Date de l'essai	Durée de prise: eau douce	Durée de prise: eau de mer
		h.	h.			h.	h.
4	6 octobre	5	12	6	6 juin	20	1,10
	20 octobre	12	18		9 juillet	10	25
	31 octobre	15	23		10 septembre	1,50	8,10
	15 novembre	14	24		8 octobre	7,50	8 00
	25 novembre	16	45		11 novembre	7,00	7,40
	1er décembre	20	50		5 décembre	9.50	10,00
	9 décembre	20	45		7 janvier	9,25	11,00
	23 février	26	4,00		19 janvier	9,25	10,30
					7 mars	13,00	13,00
5	10 novembre	20	5,40	7	23 décembre	3,10	5,35
	10 janvier	2,10	7,20		22 janvier	1,20	8,00
	10 mars	2,10	3,40		19 février	3,50	7.40
	10 avril	1,35	3,20		19 mars	8,10	10,00
	10 mai	1,20	4,10		16 avril	7,40	10,20
	10 juin	1,40	3.10		14 mai	5.00	9,00
	10 juillet	3,20	8,20		14 juin	4,10	6.25
	10 août	3,35	4,00		15 juillet	3,35	6,40
	10 septembre	3,20	4.35		19 août	7,00	10,20
	10 octobre	4,00	4,50		16 septembre	7,20	12,00

NOTA. — L'échantillon n° 3 est un ciment de deuxième qualité contenant une grande quantité de poussières lourdes. — Le n° 4 est un ciment argileux et peut cuit. — Les autres essais ont été faits sur des ciments de fabrication courante et de bonne qualité.

Désignation des ciments	Numéro d'ordre des échantillons	Résistance par centimètre								
		Ciment pur								
		7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans
		kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg	kg	kg.
Ciments calcaires (mouture fine) (Roches pures)	1	39,8	52,0	50,8	54.0	50.4	58,1	47,4	54,8	52,0
	2	44,9	53,5	46.1	47,7	42,9	46,0	»	»	»
		58,8	**72,9**	**50,2**	**49,1**	**20.1**	**9,8**	»	»	»
	3	31,9	47,9	48,4	50,4	51,1	55,7	57,5	52,9	»
		34,0	**53.5**	**68,9**	**58,0**	**63,1**	**42,7**	**14 0**	**17,6**	53,6
	4	36,0	46,7	48,5	45,2	41,7	46,9	35,1	40,7	13,3
		52,2	**62,1**	**65,5**	**66,5**	**53,7**	**18,4**	**15,8**	**26,3**	»
	•5	34.5	57,4	54,0	55,0	54,5	60,6	54,1	57,5	»
		56,1	**68.6**	**62,6**	**60.6**	**25,4**	**16.1**	**12.9**	**10,5**	»
	•6	27.6	48,1	47,7	45.2	49,7	49,4	48,1	48,7	»
		51.8	**70,7**	**53.9**	**76.0**	**30,7**	**13,7**	**9,9**	**5,5**	»
	•7	35,2	44.0	50,0	49.7	48,6	52,4	51,0	»	»
		40,0	**54,9**	**57,7**	**17,1**	**15,0**	**18,5**	**24,0**	»	»
Ciments argileux (mouture fine) (Roches pures)	8	22,2	32,8	44.5	50,0	51,6	48,8	52.0	48,6	50,9
	9	36,5	41.8	41,7	42,9	46,9	52,7	51.7	50,3	49,2
		41.0	**61,1**	**69,7**	**47.0**	**8,7**	**14.2**	**16,4**	**11,7**	**15,4**
	10	29,0	37.3	41,2	45.0	49,2	53,7	54,0	52,9	»
		32.7	**49.7**	**55,5**	**52.3**	**23,0**	**13,0**	**9,5**	»	»
	11	19.2	23.0	33,0	32,2	41,1	44,1	45,2	42,0	»
		26,0	**35,7**	**44.2**	**46,2**	**35,7**	**12,0**	**18.2**	**18.1**	»
	12	21,1	23.7	33,5	39,0	43.0	49,1	36,1	44,2	»
		17,5	**36,2**	**44.8**	**48,0**	**52,1**	**21,6**	**15,1**	**25,7**	»
	•13	21,7	39,6	49,7	51,7	46,7	49,0	48,1	57,2	»
		38.4	**57.2**	**57,8**	**15,2**	**16,8**	**10,0**	**14.4**	**9.5**	»
	•14	19,5	22.4	40,4	45,4	44,1	50,7	48,4	55,9	»
		20,0	**36,0**	**44.2**	**26,4**	**60,5**	**9,8**	**15,0**	**12,2**	»
Ciments imparfaitements cuits. Roches pures moulues finement.	15	36,3	40.0	43.4	44,2	43,5	46,7	»	51,7	»
		36.5	**54,0**	**55,5**	**36.8**	**24.7**	**14,5**	»	**9,9**	»
	•16	30.9	43.0	48,0	48,8	51,1	51,4	52,0	49,7	»
		37.5	**41,7**	**48,5**	**51,9**	**26,1**	**13,0**	**12,7**	**15,1**	»
	•17	31.8	50 6	53 2	54,7	50,4	52,5	55,4	54.4	»
		39.8	**54 8**	**58,0**	**57,2**	**56.1**	**16,0**	**17,5**	**29,1**	»
	•18	32,5	44,0	46,9	46,7	43,6	50,4	54,0	»	»
		34,6	**39.9**	**45,0**	**52,4**	**66,1**	**18,1**	**33,7**	»	»
	•19	21,1	33,2	44,5	47,2	46,4	49,2	»	»	»
		24.7	**44,4**	**52,5**	**16,2**	**11,9**	**17,9**	»	»	»
	•20	19,9	30,0	43.8	43,6	40,4	41,0	40,9	36,2	»
		19,7	23,2	38,0	41,1	46,0	48,1	»	»	»
	•21	**20,1**	**31,2**	**43,7**	**29,4**	**28,6**	**20,0**	»	»	»
		20,6	41.4	41,5	35.5	46,5	49,5	»	»	»
	•22	26,7	39,9	40,2	41,6	44,0	»	»	»	»
		33.4	**40,0**	**41.4**	**29,5**	**16.4**	»	»	»	»
	•23	31,1	39.0	41.2	44,9	42,9	»	»	»	»
		38,6	**39,1**	**50,5**	**41,6**	**34,5**	»	»	»	»
Ciments de grosse mouture. Roches pures, bien cuites.	24	27,0	40,0	48.6	56.0	53,4	56,2	»	52,9	»
		28,0	**39.7**	**55,2**	**58,9**	**53,4**	**64,5**	»	**42.0**	»
	25	25,6	32.0	42.2	47,7	52,5	52,9	56,0	52,6	»
		25,7	**39,4**	**43,6**	**50,**	**40,0**	**59,4**	**20,4**	**29,0**	»
	•26	37,1	50,1	55,5	54,5	55,2	58,3	57,5	»	»
		34,1	**40.6**	**52,9**	**50.7**	**59,8**	**65,6**	**63,7**	»	»
	•27	31,9	40 7	49,5	54.0	50,4	47,9	56,0	61,7	»
		38,4	**48,6**	**51,4**	**13,2**	**12,7**	**12,1**	**12.4**	**11,9**	»
Ciments de grosse mouture. Fabrication courante.	28	18,5	34.3	38,9	43,4	47,5	51,6	51.3	45,4	49,1
		21,3	**38,0**	**49,4**	**56,2**	**48 5**	»	**40,1**	»	»
	•29	24,8	37,4	48,0	43,0	52,0	52,9	52,2	55,1	»
		28,6	**42.5**	**51.1**	**50,0**	**33.7**	**28,4**	**23,2**	**33,4**	»
	•30	15.6	28,9	39,1	48.4	51.2	49.4	»	»	»
		27,0	**43,5**	**45,9**	**43.7**	**20,9**	**25,4**	»	»	»
	•31	24,9	38,4	44,4	48,5	46,4	51,7	56,1	»	»
		31,4	**41,6**	**52,2**	**57,0**	**40,2**	**66,5**	**70,2**	»	»

NOTA. — Pour les échantillons marqués du signe • on a employé du sable normal (quartz concassé) pour
Les résistances à l'eau douce sont imprimées en *caractères*

carré à la traction — mortier 1 : 3									Indice d'hydraulicité du ciment	Observations
7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans		
kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.		
13.4	20,8	22,2	22,5	22,9	25,5	»	»	»	0,42	
17,0	**19,0**	**20,7**	**23,2**	**20,6**	**26,7**	»	»	»	0,42	
10,5	15,0	15,8	15,8	19,0	18 5	19,7	18,9	20,2		
13,6	**16,0**	**16,5**	**16,2**	**18,5**	»	»	»	»	0,44	
14,6	20,7	23,4	23,0	21,7	23,0	20,6	21,7	»		
14,0	**16,2**	**15,1**	**16,5**	**19,6**	**20,7**	**20,5**	**22,9**	»	0,43	
18,4	30,1	35,9	36,6	37,6	37,8	37,5	41,6	»		
24,4	**28,5**	**31,6**	**30,1**	**33,4**	**33,6**	**34,1**	**40,1**	»	0,42	
15,7	27,6	33,4	35,6	34,0	34,9	35,5	35,9	»		
14,6	**21,0**	**23,0**	**24,5**	**25,0**	**19,4**	**23,0**	**27,0**	»	0,42	
14,6	24,9	29,2	33,5	34,3	39,0	43,7	»	»		
16,4	**20,0**	**25,8**	**25,9**	**25,4**	**31,5**	**30,5**	»	»	0,44	
9,0	11,1	12,1	14,3	15,6	15,4	17,5	17,0	17,5	0,49	
11,5	18,0	19,4	22,2	22,0	32,0	28,2	28,0	29,0		
»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,46	
9,1	12,3	14,5	16,1	18,2	20,4	»	»	»		
11,2	**13,0**	**14,4**	**15,2**	**16,9**	**21,6**	»	»	»	0,51	
4,9	8,6	10,2	10,2	14,0	15,9	16,0	18,0	»		
4,7	**7,9**	**7,5**	**10,0**	**11,7**	**16,2**	**19,2**	**19,7**	»	0,56	
9,0	10,6	16,0	18,1	19,7	21,9	19,1	22,7	»		
7,7	**13,1**	**14,9**	**15,4**	**17,9**	**21,1**	**26,1**	**29,7**	»	0,51	
8,1	18,5	25,5	28,7	32,1	31,9	29,6	34,9	»		
11,9	**17,2**	**20,1**	**19,9**	**20,5**	**24,1**	**27,3**	**30,5**	»	0,47	
6,2	12,6	20,2	27,5	28,5	34,7	32,2	37,0	»		
7,4	**11,7**	**20,2**	**24,5**	**26,9**	**28,6**	**30,6**	**37,2**	»	0,52	
17,0	20,1	22,6	20,4	24,4	25,6	»	25,2	»	»	
17,4	**20,9**	**21,6**	**20,0**	**22,5**	**22,7**	»	**24,4**	»	»	
9,8	19,1	25,9	29,5	31,1	30,7	31,9	31,5	»	»	
13,6	**16,6**	**22,2**	**24,2**	**21,2**	**26,5**	**32,5**	**31,0**	»	»	
14,4	21,7	26,1	30,7	32,1	32,5	33,4	32,8	»	»	
14,4	**19,7**	**23,7**	**23,1**	**22,4**	**24,7**	**30,2**	**32,7**	»	»	
12,7	21,6	28,4	30,5	33,4	38,0	37,2	»	»	»	
14,7	**19,4**	**25,1**	**27,6**	**27,9**	**32,7**	**33,7**	»	»	»	
9,9	17,2	26,5	31,8	35,4	39,0	»	»	»	»	**même ciment que le n. 18, après 6 mois de séjour en baril.**
16,2	**22,0**	**27,1**	**28,0**	**28,4**	**32,1**	»	»	»	»	
10,5	22,7	29,5	31,5	36,0	32,1	36,1	36,8	»	»	
13,5	16,4	25,2	29,9	36,1	40,4	»	»	»	»	
11,7	**16,2**	**27,4**	**30,6**	**29,6**	**30,4**	»	»	»	»	
14,0	23,5	32,9	37,6	47,6	57,6	»	»	»	»	à l'air.
18,9	25,1	33,4	38,5	40,5	»	»	»	»	»	
18,7	**24,5**	**30,5**	**29,8**	**33,4**	»	»	»	»	»	
17,0	24,1	30,0	36,4	37,1	»	»	»	»	»	
18,0	**22,4**	**28,2**	**30,5**	**30,9**	»	»	»	»	»	
9,4	11,1	13,2	13,7	15,0	16,6	»	17,3	»	»	
9,8	**11,4**	**13,1**	**14,5**	**15,6**	**16,5**	»	**20,9**	»	»	
3,6	7,2	8,9	9,7	9,4	11,4	10,9	12,2	»	»	
4,3	**7,2**	**10,1**	**11,7**	**10,8**	**15,2**	**14,6**	**18,9**	»	»	
8,4	14,2	19,2	22,4	26,0	24,9	25,6	»	»	»	
10,7	**13,1**	**16,5**	**20,0**	**21,6**	**26,6**	**28,2**	»	»	»	
8,9	15,1	20,6	26,6	25,7	25,2	27,1	29,9	»	»	
8,4	**12,7**	**19,6**	**21,2**	**26,0**	**23,2**	**28,4**	**30,7**	»	»	
5,6	11,4	12,5	14,0	13,0	14,5	14,6	14,6	»	»	
7,5	**10,8**	**13,4**	**13,6**	**14,8**	**16,4**	»	»	»	»	
4,0	7,7	9,1	9,1	11,0	11,5	10,7	12,4	»	»	
5,2	**7,8**	**9,0**	**8,5**	**10,9**	**14,4**	**15,4**	**18,0**	»	»	
7,0	13,0	19,7	25,6	27,4	28,9	»	»	»	»	
9,1	**16,1**	**20,9**	**24,4**	**26,7**	**27,6**	»	»	»	»	
9,9	16,2	23,4	27,0	25,5	30,7	30,1	»	»	»	
11,5	**17,0**	**21,2**	**24,1**	**24,0**	**28,0**	**30,9**	»	»	»	

la confection des mortiers. Pour les autres échantillons on s'est servi d'un sable naturel tamisé.
ordinaires et la résistance à l'eau de mer en ***caractères noirs***.

TABLEAU

Désignation des ciments	Numéro d'ordre des échantillons	Résistance par centimètre								
		Ciment pur								
		7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans
		kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Ciments de fabrication courante contenant environ 10 °/° de poussières lourdes. Mouture fine.	1	28,6 **30,0**	41,0 **43,5**	45,6 **57,6**	52,3 **57,1**	54,7 **59,2**	54,0 **31,1**	54,0 **48,0**	57,4 **34,0**	51,5 **41,5**
	2	28 6 **29,8**	38,8 **44,6**	47,2 **59,0**	51,9 **61,7**	49,7 **55,8**	55,4 **50,1**	43,5 **32,7**	54,5 **32,9**	58,0 **45,6**
	3	28.4 **32,9**	38,2 **44,8**	44.4 **52,0**	50,5 **57,7**	50,5 **58,6**	51,4 **31,6**	50,1 **21,5**	51,6 **23,0**	» »
	•4	26,5 **27,0**	37,2 **40.7**	40,5 **49,3**	42,1 **55,5**	44,5 **16,9**	45,1 **10,4**	45,6 **11,7**	44,9 **8,6**	» »
	•5	31.0 **37,4**	44,1 **43.4**	47,6 **55,6**	53,4 **51,4**	45,0 **53,1**	54,0 **55,0**	52,0 **53,2**	» »	» »
Ciments contenant environ 40 à 50 °/₀ de poussières lourdes. Mouture fine.	6	26,2 **25,4**	35.3 **38,4**	44,4 **53,6**	49,0 **61,6**	51,5 **63,8**	58,1 **64,0**	55,1 **26,2**	53,7 **22,5**	56.5 **36,3**
	•7	24,9 **24,0**	33,0 **34,2**	39,0 **38,9**	42.4 **52,2**	44,5 **62,5**	44,5 **56,1**	47,9 **56,0**		
	•8	18,4 **21,0**	29,2 **33,2**	38,9 **49,1**	41,2 **45,9**	47,0 **21,4**	40,5 **17,2**	45,2 **19,2**	44,5 **18,0**	
Ciments contenant environ 60 à 80 °/₀ de poussières lourdes. Mouture fine.	9	20,7 **19,2**	30,0 **29,0**	41,5 **44,6**	46,7 **49,4**	47,4 **58,7**	52,2 **26,2**	» »	51,5 **35.2**	
	10	12,0 **13,1**	19,4 **22,5**	27,6 **36,5**	36,4 **47,5**	45,0 **42,1**	46,2 **55,2**	46,2 **51,7**	50.4 **28.4**	53,9 **34,6**
	•11	13,1 **12,6**	17,7 **21,7**	24,9 **33,6**	29.2 **37,6**	35,0 **45,0**	31,5 **46,6**	36,4 **53,4**	» »	
	12	17,8 **18,8**	23,1 **27,4**	30,7 **45,0**	36,8 **42,5**	44,4 **48,0**	47,7 **37,9**	» »	46,9 **48,1**	
Ciments de qualité inférieure, composés de poussières lourdes et d'incuits.	•13	19,7 **10,9**	21,1 **17,4**	30,9 **30,6**	33,9 **39,0**	35.5 **38,7**	44,0 **42,9**	45,8 **33,6**		
	•14	10,0 **10,7**	16,3 **17,4**	24,0 **26,6**	17,2 **36,1**	34,2 **41,1**	38,7 **43,5**	40,4 **36,9**		
	•15	9,9 **7,6**	11,8 **13,8**	17,6 **21,6**	23,0 **33,9**	30,6 **42,0**	36,5 **37,0**	35,1 **40,9**		
	•16	11,0 **15,0**	22,1 **23,8**	27,2 **31,7**	33,5 **29,6**	35,0 **24,1**	35,6 **28,0**			

Nota. — Les mortiers 1 : 3 des échantillons marqués du signe • ont été confectionnés avec du sable
Les résistances à l'eau douce sont imprimées en *caractères*

N° IX

carré à la traction									Indice d'hydraulicité des ciments	Observations
Mortier 1 : 3										
7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans		
kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.		
11,1	15,5	16,8	17,1	23,1	24,4	25,7	27,4	26,5	0,47	
12,8	**13,6**	**14,5**	**16,0**	**19,5**	**19,2**	»	»	»		
10,7	13,1	15,6	17,1	17,9	18,0	»	»	»	0,47	
12,0	**12,8**	**15,1**	**16,0**	**16,5**	**19,5**	»	**25,0**	**26,0**		
9,5	10,0	12,6	13,8	14,2	16,1	17,5	17,4	»	0,49	
9,1	**11,2**	**12,4**	**12,5**	**13,9**	**17,5**	**19,5**	**21,4**	»		
15,7	21,0	27,4	25,6	33,5	31,6	37,6	35,8	»	0,48	
10,9	**17,5**	**21,0**	**25,0**	**22,4**	**28,1**	**28,9**	**32,6**	»		
10,2	16,6	24,0	30,4	30,5	32,9	35,1	»	»	0,46	
12,5	**19,1**	**22,0**	**23,0**	**24,5**	**28,1**	**33,0**	»	»		
8,4	12,6	13,0	15,9	17,5	20,6	20,5	21,0	22,0	0,51	
10,4	**12,4**	**13,0**	**14,8**	**16,1**	**16,6**	**20,0**	**22,9**	**26,3**		
9,5	15,6	20,6	26,5	28,5	31,2	32,2	»	»	0,55	
10,2	**15,4**	**23,5**	**25,7**	**27,7**	**31,9**	**33,6**	»	»		
6,1	12,1	18,5	21,9	23,4	19,4	24,7	29,4	»	»	
6,2	**12,0**	**17,3**	**20,2**	**17,6**	**17,1**	**26,4**	**31,1**	»		
5,0	7,5	10,5	11,1	13,5	16,1	»	17,9	»	0,58	
7,2	**10,9**	**13,6**	**13,6**	**14,5**	**14,2**	»	**20,5**	»		
3,2	6,7	8,8	10,6	12,7	16,1	12,7	»	»	0,58	
4,8	**7,4**	**9,7**	**13,0**	**14,2**	**15,2**	»	»	»		
6,7	11,4	19,9	25,5	27,4	30,6	32,4	»	»	0,59	
7,0	**12,1**	**21,2**	**24,2**	**21,2**	**30,5**	**32,5**	»	»		
4,0	7,0	8,6	10,7	11,1	14,6	»	14,2	»	0,61	
4,8	**8,0**	**9,4**	**11,9**	**12,0**	**14,5**	»	**18,0**	»		
8,0	12,2	20,1	23,1	29,8	37,9	37,7	»	»	0,57	
7,7	**11,4**	**23,0**	**27,0**	**29,2**	**34,6**	**34,9**	»	»		
2 8	6,0	7,0	9,2	15,7	15,1	22,5	»	»	0,55	Ciment moulu très grossièrement.
3,6	**8,1**	**13,2**	**18,5**	**21,4**	**25,0**	**25,6**	»	»		
4,9	8,6	13,2	20,4	26,7	30,0	32,1	»	»	»	
4,6	**11,0**	**17,9**	**24,0**	**28,1**	**30,5**	**30,2**	»	»		
5,7	14,0	23,1	27,7	35,0	38,9	»	»	»	0,65	
9,0	**17,1**	**28,5**	**28,2**	**30,1**	**33,0**	»	»	»		

normal (quartz concassé). Pour les autres échantillons on s'est servi de sable ordinaire tamisé.
ordinaires et les résistances à l'eau de mer en *caractères noirs*.

TABLEAU

Numéro d'ordre des échantillons	Désignation des ciments	Résistance par centimètre							
		Ciment pur							
		7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans
		kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
1	Ciment argileux Roches choisies Mouture fine.	182,5	350,0	365,0	526,7	575,0	»	650,0	775,0
		190,0	**295,0**	**365,0**	**442,7**	**400,0**	»	**300,0**	»
2	Ciment calcaire Roches choisies Mouture fine.	302,5	628,0	705,0	780,0	800,0	670,0	640,8	820,0
		300,0	**570,0**	**580,0**	**686,7**	**516,0**	**306,7**	**313,3**	**333,3**
3	Ciment de grosse mouture Roches choisies	205,0	330,0	513,3	533,3	513,3	566,7	683,3	
		178,3	**250,0**	**363,3**	**416,7**	**430,0**	**423,3**	**456,7**	
4	Ciment de grosse mouture contenant environ 20 °/₀ de poussières lourdes	171,7	273,3	353,3	420,0	490,0			
		135,0	**200,0**	**283,3**	**266.7**	**275,0**	»	»	
5	Ciment contenant environ 10 °/₀ de poussières lourdes. Mouture fine.	271,7	420,0	540,0	640,0	610,0	670,0	620,0	776,7
		206,7	**326,7**	**470,0**	**576,7**	**545,0**	**425,0**	**376,7**	**533,3**
6	Ciment contenant environ 20 °/₀ de poussières lourdes. Mouture fine.	273,3	416,7	466,7	580,0	563,3	606,7	643,3	770,0
		230,0	**380,0**	**400,0**	**540,0**	**456,7**	**346,7**	»	**325,0**
7	Ciment contenant environ 20 °/₀ de poussières lourdes. Mouture fine.	236,7	356,7	490,0	583,3	610,0	576,7	680,0	700,0
		156,7	**270,0**	**343,3**	**400,0**	**366,7**	»	**443,3**	**500,0**
8	Ciment contenant environ 60 à 80 °/₀ de poussières lourdes.	230,0	260,0	400,0	463,3	446,7	483,3	610,0	
		126,7	**200,0**	**263,3**	**333,3**	**356,7**	**340,0**	**433,3**	
9	Ciment de 2ᵉ qualité Poussières lourdes et incuits. Mouture fine.	173,3	235,0	330,0	400,0	456,7	523,3	616,7	600,0
		115,0	**150,0**	**191,7**	**255,0**	**340,0**	**356,7**	**353,3**	**375,5**

Nota. — Les résistances à l'eau douce sont imprimées en *caractères*

N° X

carré à la compression								Observations
mortier : 1 : 3								
7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	
kg.	kg	kg.	kg.	kg.	kg	kg.	kg.	
83,3	124,0	142,0	193,3	193,3	195,0	206,7	360,0	Indice d'hydraulicité : 0,48.
79,7	**110,3**	**132,0**	**150,0**	**156,7**	**160,0**	**163,3**	**173,3**	
117,0	180,0	215,0	245,0	263,3	250,8	250,0	276,3	Indice d'hydraulicité : 0,43.
86,7	**111,0**	**145,0**	**151,7**	**165,0**	**213,3**	**198,3**	**233,3**	
65,0	103,3	135,0	150,0	160,0	200,0	203,3	»	
61,7	**81,7**	**98,3**	**138,3**	**120,0**	**133,3**	**130,0**	»	
68,3	85,0	123,3	148,3	166,7	186,7	205,7	»	
60,0	**85,0**	**108,3**	**125,0**	**120,0**	**125,0**	**148,3**	»	
125,0	176,7	243,3	263,3	290,0	326,7	310,0	310,0	
110,3	**165,0**	**215,0**	**226,7**	**233,3**	**220,0**	**200,0**	**230,0**	
120,0	186,7	218,3	256,6	253,3	240,0	286,7	316,7	
110,0	**151,7**	**185,0**	**196,7**	**210,0**	**180,0**	»	**206,7**	
101,3	173,3	190,0	231,7	266,7	246,7	263,3	306,7	
88,0	**140,0**	**168,3**	**195,0**	**186,7**	»	**176,7**	**216,7**	
81,7	108,3	130,0	163,3	180,0	196,7	230,0	»	
70,0	**86,7**	**120,0**	**141,7**	**136,7**	**150,0**	**163,3**	»	
73,3	101,7	148,3	175,0	215,0	213,3	223,3	236,7	
75,0	**125,0**	**118,3**	**140,0**	**168,3**	**150,0**	**163,3**	**163,3**	

ordinaires et les résistances à l'eau de mer en *caractères noirs*.

TABLEAU

Désignation des ciments	Résistance par								
	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans
	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Première série									
I. Ciments de roches choisies Mouture fine.	32,5	43,8	45,9	47,4	48,0	50,9	49,9	46,5	48,5
	40,5	**56,7**	**62,0**	**55,3**	**40,1**	**27,5**	**17,7**	**21,4**	**11,5**
II. Ciments de fabrication courante Mouture fine.	28,5	38,8	46,1	48,7	51,5	51,6	49,1	50,4	55,0
	31,3	**43,7**	**55,5**	**56,1**	**58,5**	**44,9**	**28,3**	**28,8**	**41,0**
III. Ciments de fabrication courante Grosse mouture.	23,9	34,9	41,2	46,0	50,0	50,0	51,3	49,0	49,9
	27,5	**40,0**	**49,3**	**52,2**	**53.8**	**40,9**	**30,0**	**32,6**	**42,4**
IV. Ciments de deuxième qualité.	17,2	24,5	32,9	38,7	44,4	47,8	44,8	48,4	53,9
	17,9	**26,9**	**40,2**	**45,4**	**44,6**	**41,0**	**42,4**	**37,2**	**34.6**
Deuxième série									
I. Ciments de roches choisies Mouture fine.	32,7	49,2	48,7	48,1	47,5	48,7	48,6	47,8	»
	44,2	**59,6**	**55,3**	**52,7**	**22,1**	**12,9**	**10,3**	**8,3**	»
II. Ciments de fabrication courante Mouture fine.	29,8	40,2	46,9	48,1	47,6	47,6	50,4	51,9	»
	32,9	**47,0**	**53,9**	**46,5**	**29,5**	**14,1**	**25,3**	**12,1**	»
III. Ciments de fabrication courante Grosse mouture.	24,8	34,5	42,9	46,4	47,5	44,8	49,4	53,1	»
	26,6	**37,6**	**48,5**	**37,9**	**28,5**	**30,8**	**22,5**	**14,9**	»
Eprouvettes conservées à l'air. Ciments de grosse et fine mouture.	25,2	34,2	40,3	50,1	55,9	58.4	»	60,4	76.6
	25,7	**37,1**	**44,0**	**52,6**	**57,8**	**61,4**	»	**61,6**	»
Essais à l'écrasement. Ciments de grosse et fine mouture.	230	355	460	556	572	614	661	775	»
	205	**307**	**385**	**445**	**423**	**402**	**416**	**424**	»

NOTA. — Les mortiers de ciments de la première série et ceux des ciments conservés à l'air ont été faits concassé et tamisé). — Les résistances à l'eau douce sont imprimées en

N° XI

centimètre carré									Observations
7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans	
kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	
12,30	17,5	18,6	20,4	21,5	22,4	23,1	22,8	25,8	Moyenne de 20 échantillons.
13,8	**15,8**	**16,5**	**17,8**	**18,5**	**20,2**	**20,1**	**21,3**	**26,2**	
10,1	12,4	13,2	15,0	16,8	18,2	18,8	18,8	24,1	Moyenne de 14 échantillons.
11,0	**12,2**	**13,4**	**14,3**	**16,1**	**17,2**	**19,1**	**21,9**	**26,0**	
6,0	9,0	10,3	11,4	12,1	12,9	12,9	13,9	13,9	Moyenne de 12 échantillons.
7,6	**9,9**	**11,5**	**12,0**	**12,5**	**14,5**	**16,0**	**17,9**	**22,7**	
4,0	7,0	9,3	10,8	12,1	15,6	12,7	16,0	»	Moyenne de 14 échantillons.
5,6	**8,7**	**10,9**	**12,8**	**13,6**	**14,6**	»	**19,2**	»	
16,6	25,2	30,9	32,9	34,2	34,2	35,2	37,8	»	Moyenne de 13 échantillons.
17,6	**22,5**	**25,0**	**24,5**	**26,2**	**26,7**	**30,2**	**33,9**	»	
12,6	19,7	25,8	29,4	31,3	29,5	30,9	33,2	»	Moyenne de 18 échantillons.
12,6	**17,7**	**21,6**	**22,8**	**23,4**	**25,8**	**30,2**	**31,9**	»	
7,7	13,4	18,9	23,9	25,4	24,7	27,9	29,6	»	Moyenne de 3 échantillons.
7,5	**12,8**	**19,1**	**21,7**	**22,9**	**23,0**	**28,4**	**30,9**	»	
10,1	14,8	22,2	27,5	30,2	31,4	»	39,1	»	Moyenne de 30 échantillons.
13,3	**18,5**	**25,8**	**33,4**	**37,4**	**39,6**	»	**41,0**	»	
90	133	166	201	208	233	246	324	»	Moyenne de 21 échantillons.
80	**112**	**149**	**163**	**165**	**170**	**179**	**219**	»	

avec du sable ordinaire tamisé. Pour les autres échantillons on a employé le sable normal (quartz
caractères ordinaires et les résistances à l'eau de mer en *caractères noirs*.

GRAPHIQUE N° 6

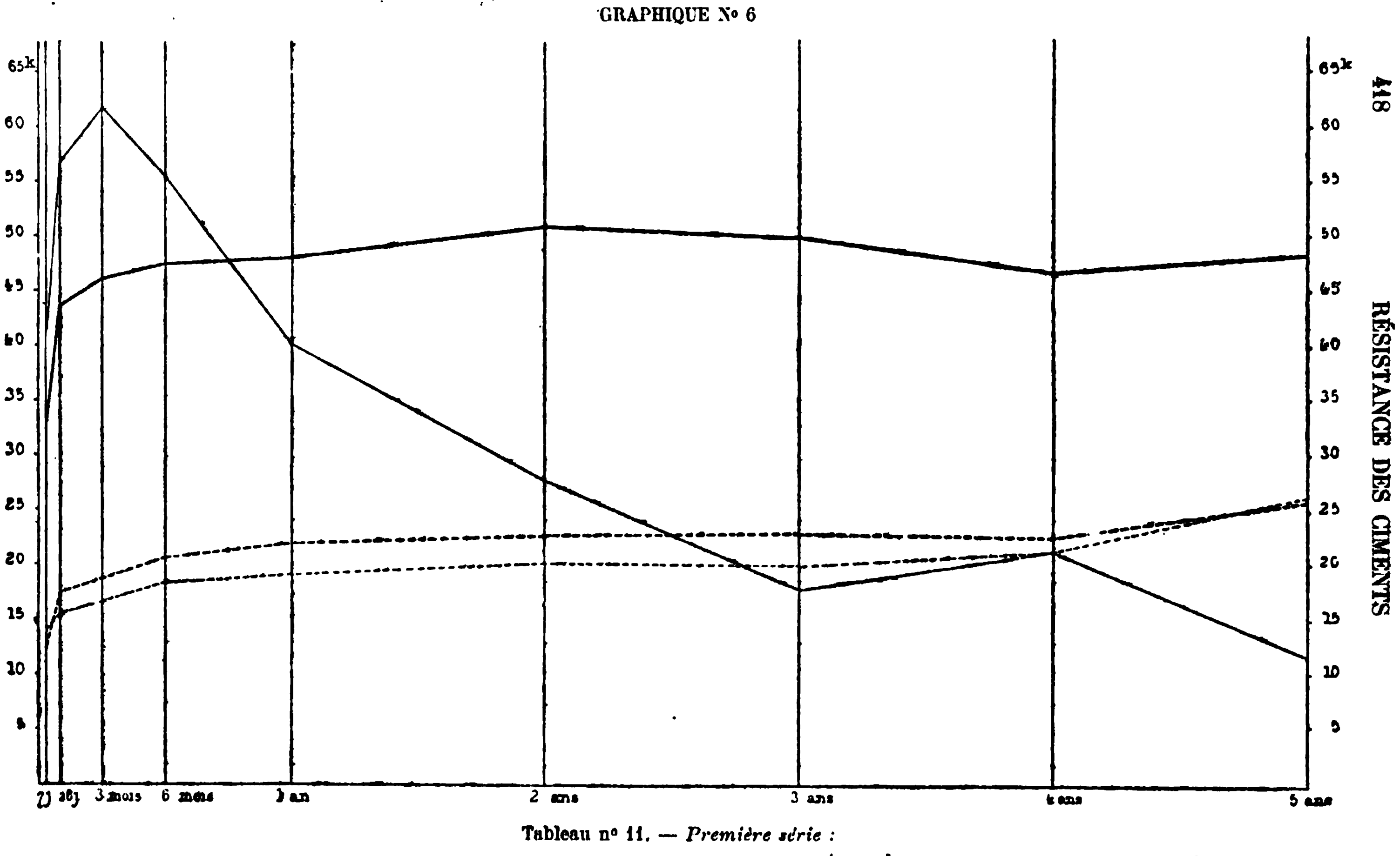


Tableau n° 11. — *Première série :*

I. Ciments de roches choisies. Mouture fine. Moyenne de 20 échantillons. Ciment pur { eau douce / eau de mer — Mortier 1 : 3 { eau douce / eau de mer

GRAPHIQUE N° 7

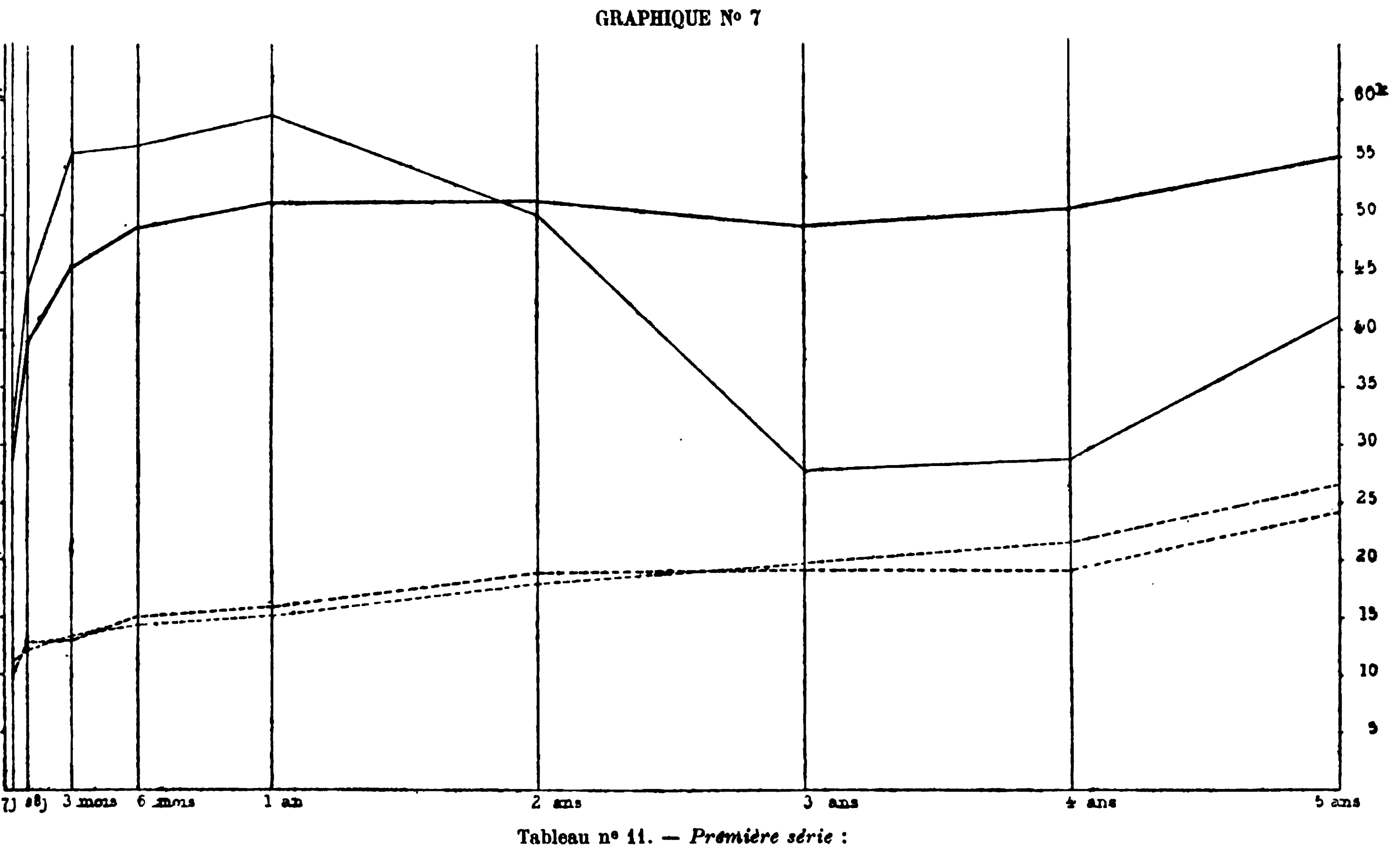


Tableau n° 11. — *Première série :*

II. Ciment de fabrication courante. Fine mouture. Moyenne de 14 échantillons. Ciment pur { eau douce / eau de mer — Mortier 1 : 3 { eau douce / eau de mer

GRAPHIQUE N° 8

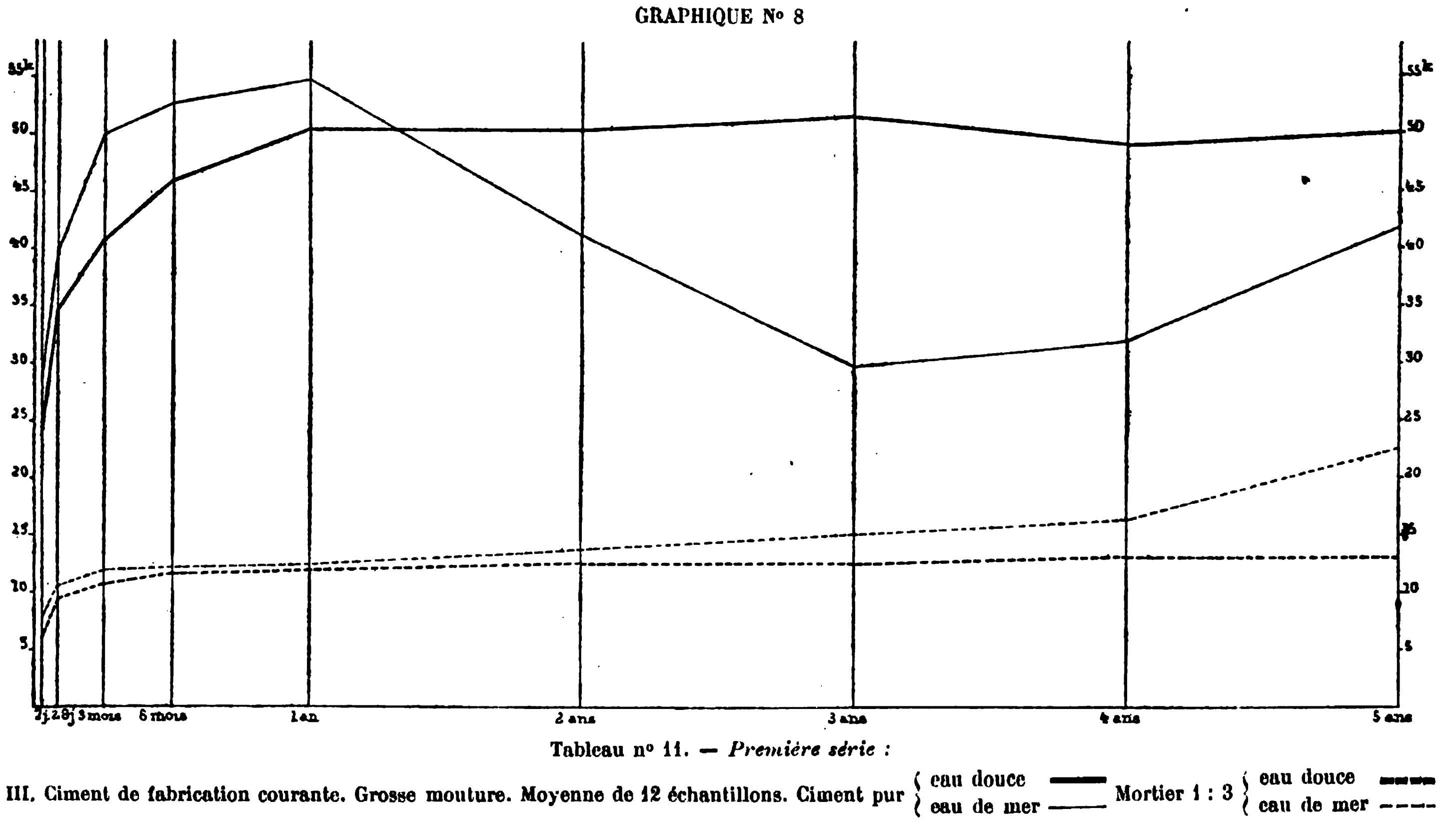


Tableau n° 11. — *Première série :*

III. Ciment de fabrication courante. Grosse mouture. Moyenne de 12 échantillons. Ciment pur { eau douce ▬▬▬ / eau de mer ——— Mortier 1 : 3 { eau douce ▬ ▬ ▬ / eau de mer - - - -



GRAPHIQUE N° 9

55k 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5

7j 28j 3 mois 6 mois 1 an 2 ans 3 ans 4 ans 5 ans

Tableau n° 11. — *Première série :*

IV. Ciments de deuxième qualité. Moyenne de 4 échantillons. Ciment pur { eau douce ▬▬ / eau de mer —— } Mortier 1 : 3 { eau douce ▬ ▬ ▬ / eau de mer - - - - }

GRAPHIQUE N° 10

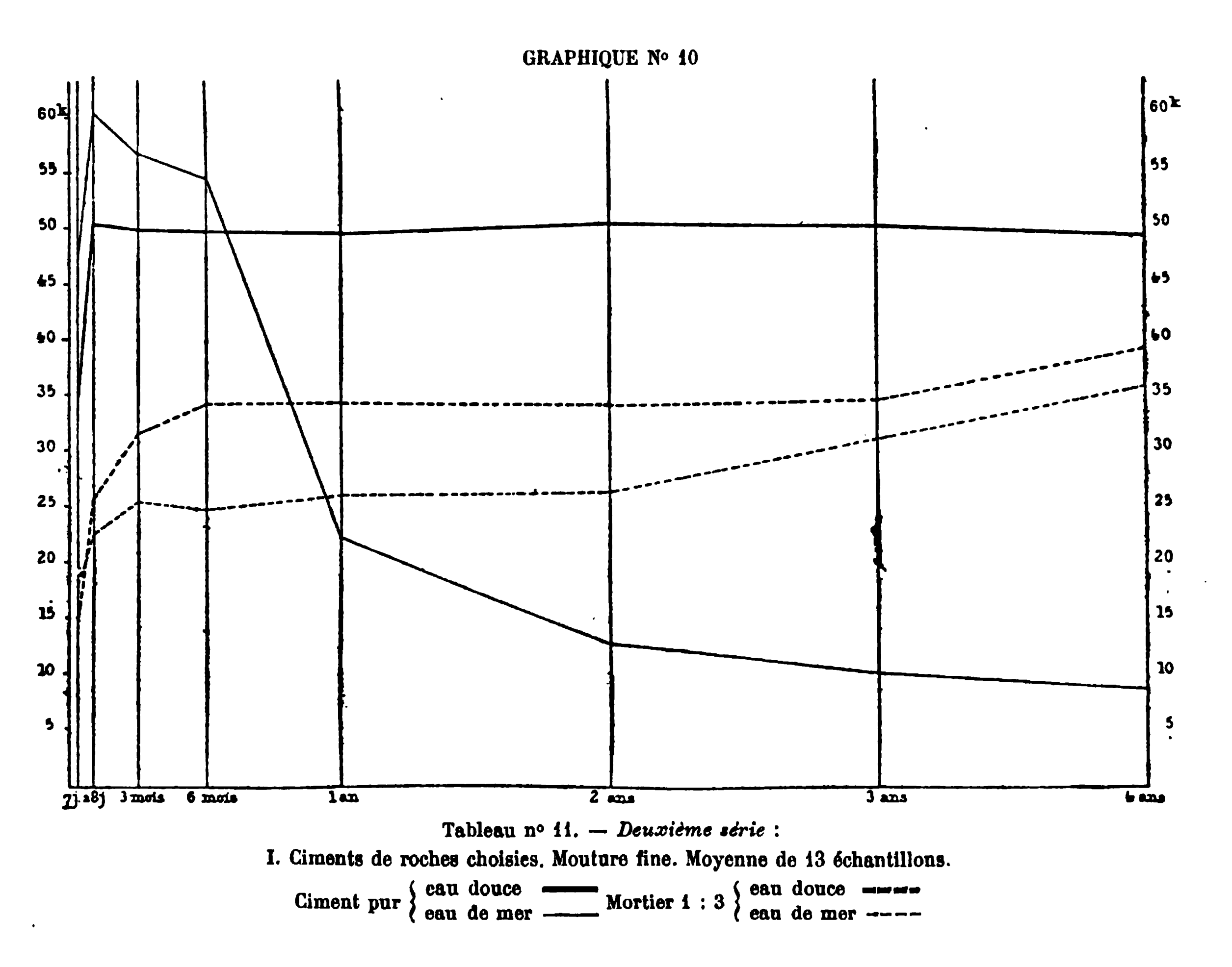


Tableau n° 11. — *Deuxième série* :

I. Ciments de roches choisies. Mouture fine. Moyenne de 13 échantillons.

Ciment pur { eau douce ━━━ / eau de mer ——— Mortier 1 : 3 { eau douce ━ ━ ━ / eau de mer - - - -

GRAPHIQUE N° 11

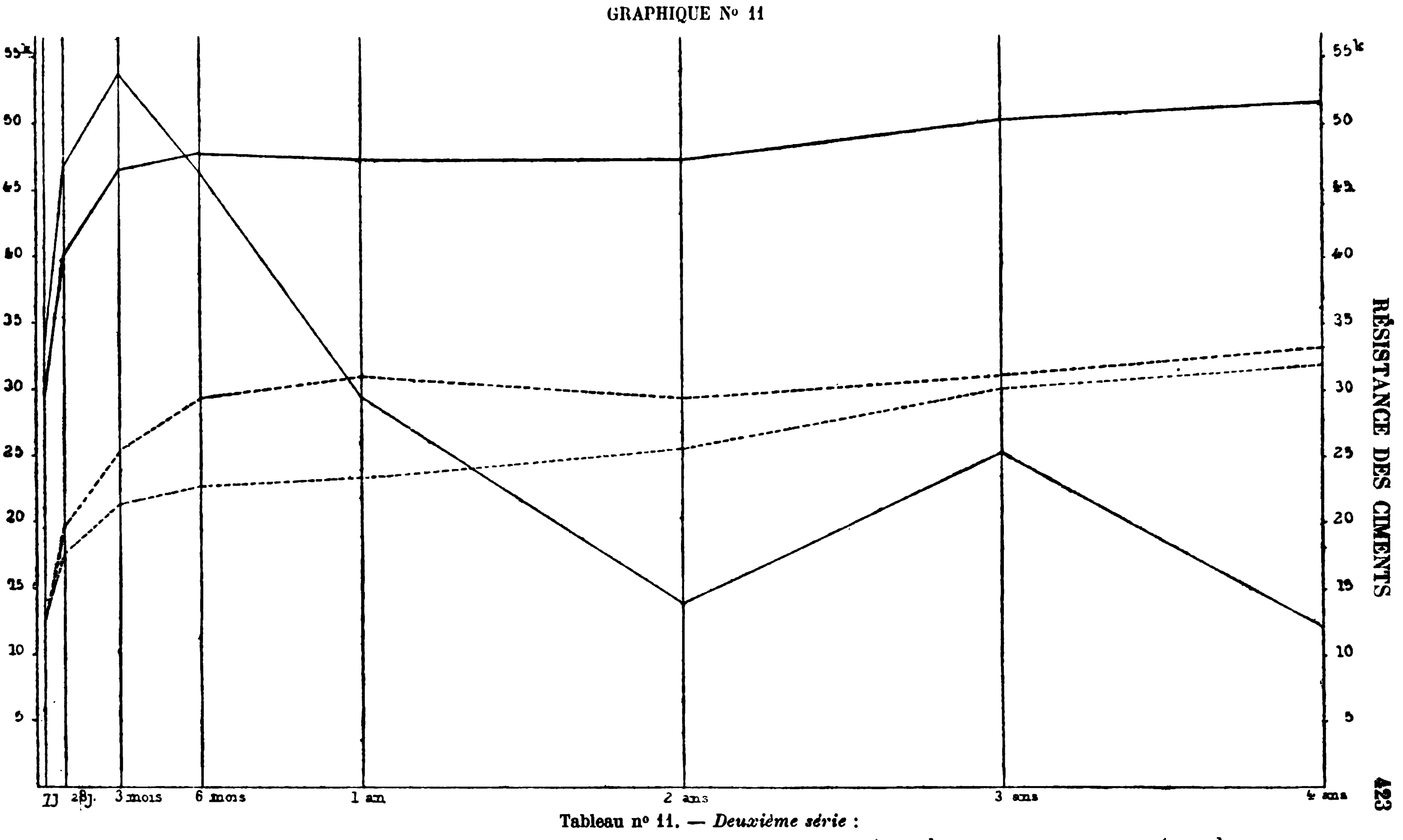


Tableau n° 11. — *Deuxième série :*

II. Ciments de fabrication courante. Mouture fine. Moyenne de 16 échantillons. Ciment pur { eau douce / eau de mer — Mortier 1 : 3 { eau douce / eau de mer

GRAPHIQUE N° 12

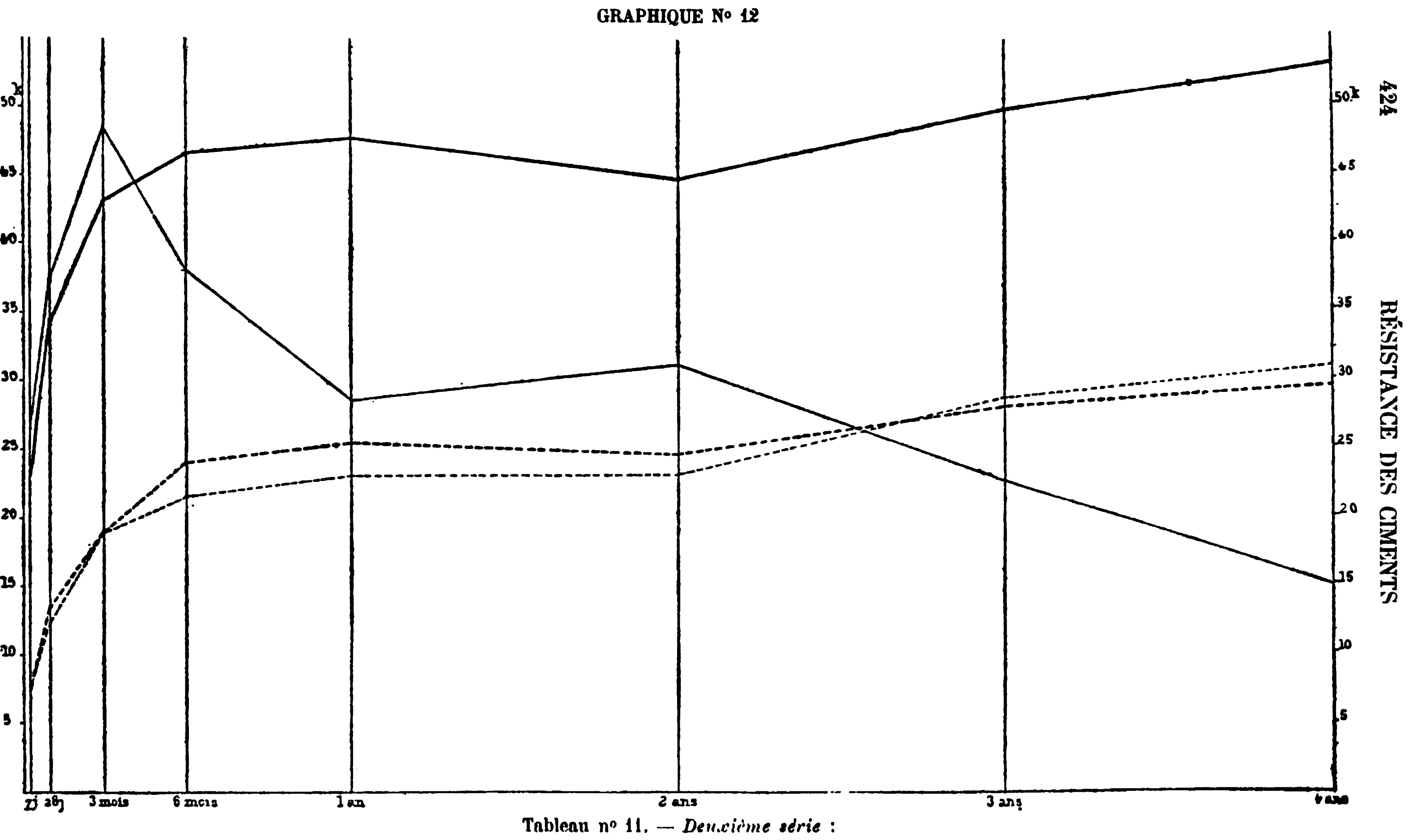
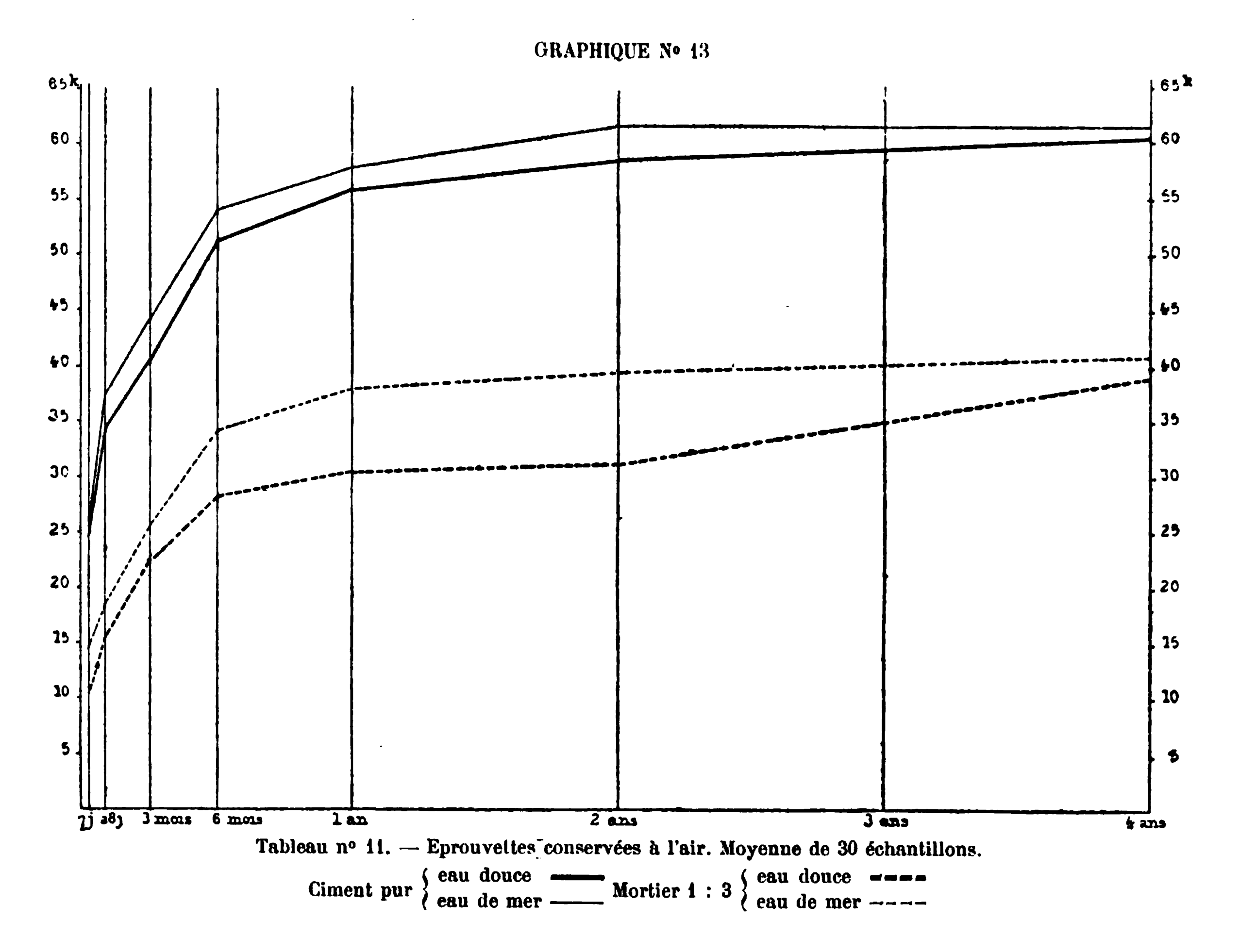


Tableau n° 11. — *Deuxième série :*

III. Ciments de fabrication courante. Grosse mouture. Moyenne de 3 échantillons. Ciment pur { eau douce ▬▬ / eau de mer —— Mortier 1 : 3 { eau douce ▬ ▬ ▬ / eau de mer - - - -


GRAPHIQUE No 13
65k
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
7j
28j
3 mois
6 mois
1 an
2 ans
3 ans
4 ans
Tableau no 11. — Eprouvettes conservées à l'air. Moyenne de 30 échantillons.
Ciment pur { eau douce
eau de mer
Mortier 1 : 3 { eau douce
eau de mer

GRAPHIQUE N° 14

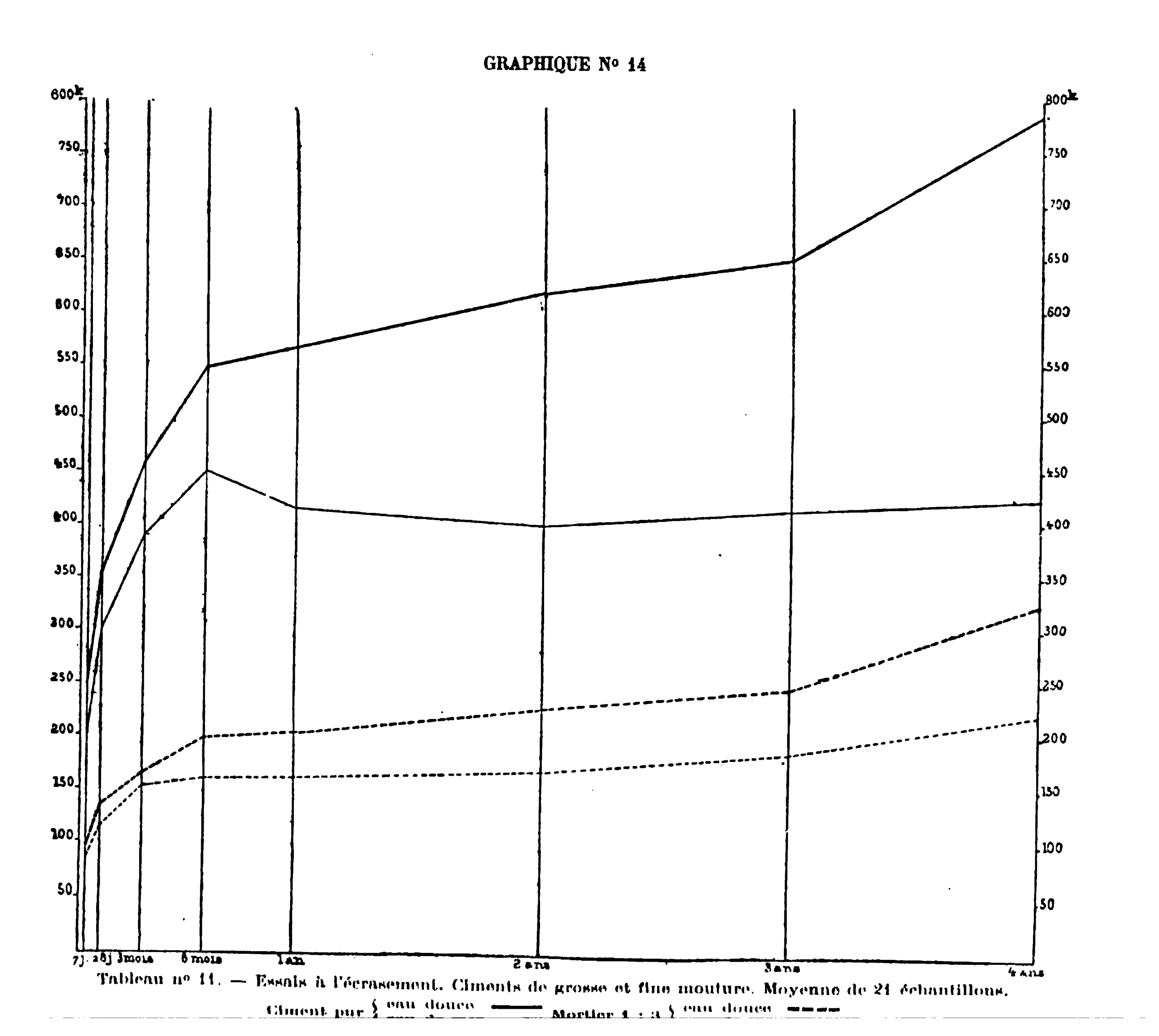


Tableau n° 11. — Essais à l'écrasement. Ciments de grosse et fine mouture. Moyenne de 21 échantillons.

Ciment pur { eau douce

TABLEAU N° XII

Influence de la quantité d'eau de gâchage sur la résistance des mortiers

Numéro d'ordre des essais	Quantité d'eau de gâchage	Résistance par centimètre carré à la traction: 7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	Observations
		k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	
1	8	14,4	22,7	19,5	21,0	19,0	21,2	23,2	23,0	Mortiers 1 : 3 Sable naturel
	10	13,5	20,8	22,2	22,6	23,0	22,9	25,5	25,8	
	12	11,5	20,0	20,6	20,9	21,9	22,5	22,9	23,2	
	14	6,6	11,0	13,0	14,3	15,5	15,4	17,6	18,7	
	16	3,2	9,4	11,4	12,4	12,2	14,4	15,1	15,1	
2	10	12,9	15,7	20,0	15,5	18,2	17.7	17,2	»	»
	12	13,2	20,1	20,9	21,8	23,0	24,2	27,2	»	
	14	8,1	15,0	15,8	17,5	17,0	19,2	22,5	»	
	16	6,8	12,7	16,0	17,0	»	»	»	»	
3	23	32,1	40,8	53,1	54,0	58,5	56,0	54,2	»	Ciment pur Eau douce
	24	30,1	41,4	47,0	49.4	48,0	49,5	55,5	»	
	25	30,4	39,5	49,2	49.0	51,0	55,5	61,0	»	
	26	29,4	41,4	48,2	50,1	50,0	61,5	57,7	»	
	27	27,6	42,4	45,1	47,1	48,0	57,7	58,0	»	
	28	25,9	40,3	47,2	47,0	51,5	58,0	55,5	»	
4	25	38,6	51,8	50,2	48,2	49,5	47,2	54,2	»	Ciment pur Eau douce
	27	37,9	46,1	45,2	48,2	46,0	46,0	47,5	»	
	29	36,0	45,9	48,0	47,6	39,5	43,7	47,2	»	
	31	29,5	42,2	45,2	46,0	40,7	41,5	47,5	»	

Mortiers confectionnés avec du sable normal

Essais à la compression. Mortier 1 : 3

Numéro d'ordre des essais	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré: 7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	Observations
5	8 (1)	1,97	98,3	115,0	140,0	183,3	180,0	186,7	246,7	
	10	2,05	108,3	125,0	163,3	185,7	190,0	230,0	256,7	
	12	2,11	91,7	128,3	163,3	200,0	260,0	253,3	283,3	
	14	2,05	61,7	91,7	133,3	153,3	196,7	210,0	230,0	
6	8 (1)	1,90	91,7	125,0	145,0	»	146,7	»	»	Ciment fin
	8	2,14	180,0	260,0	300,0	»	310,0	»	»	
	10	2,19	136,7	226,7	280,0	»	310,0	»	»	
	12	2,15	98,3	150.0	206,7	»	240,0	»	»	
	14	2,08	58,3	103,3	158,3	»	156,7	»	»	
7	8 (1)	1,96	68,3	108,3	135,0	»	151,7	»	»	Ciment moulu grossièrement
	8	2,05	105,0	136,7	183,3	»	190,0	»	»	
	10	2,12	85,0	136,7	176,7	»	193,0	»	»	
	12	2,08	56,7	95,0	135,0	»	160,0	»	»	
	14	2,03	37,0	61,7	95,0	»	110,0	»	»	

Essais à la traction. Mortier 1 : 3

Numéro d'ordre des essais	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré: 7 jours	28 jours	3 mois	1 an	Observations
8	8 (1)	2,00	16,6	18,1	24,5	30,7	Ciment fin
	8	2,11	18,2	26,1	28,0	36,5	
	10	2,19	16,6	25,2	33,7	37,7	
	12	2,13	9,6	17,7	24,2	29,5	
	14	2,04	7,1	11,4	18,1	22,2	
9	8 (1)	1,94	9,4	13,6	17,1	21,2	Ciment moulu grossièrement
	8	2,01	11,4	17,9	22,3	26,0	
	10	2,10	11,2	16,3	19,4	26,0	
	12	2,01	7,0	14,2	17,6	22,3	
	14	2,03	4,1	6,9	13,0	16,4	

(1) Mortiers qui n'ont pas été tassés suffisamment.

GRAPHIQUE N° 15

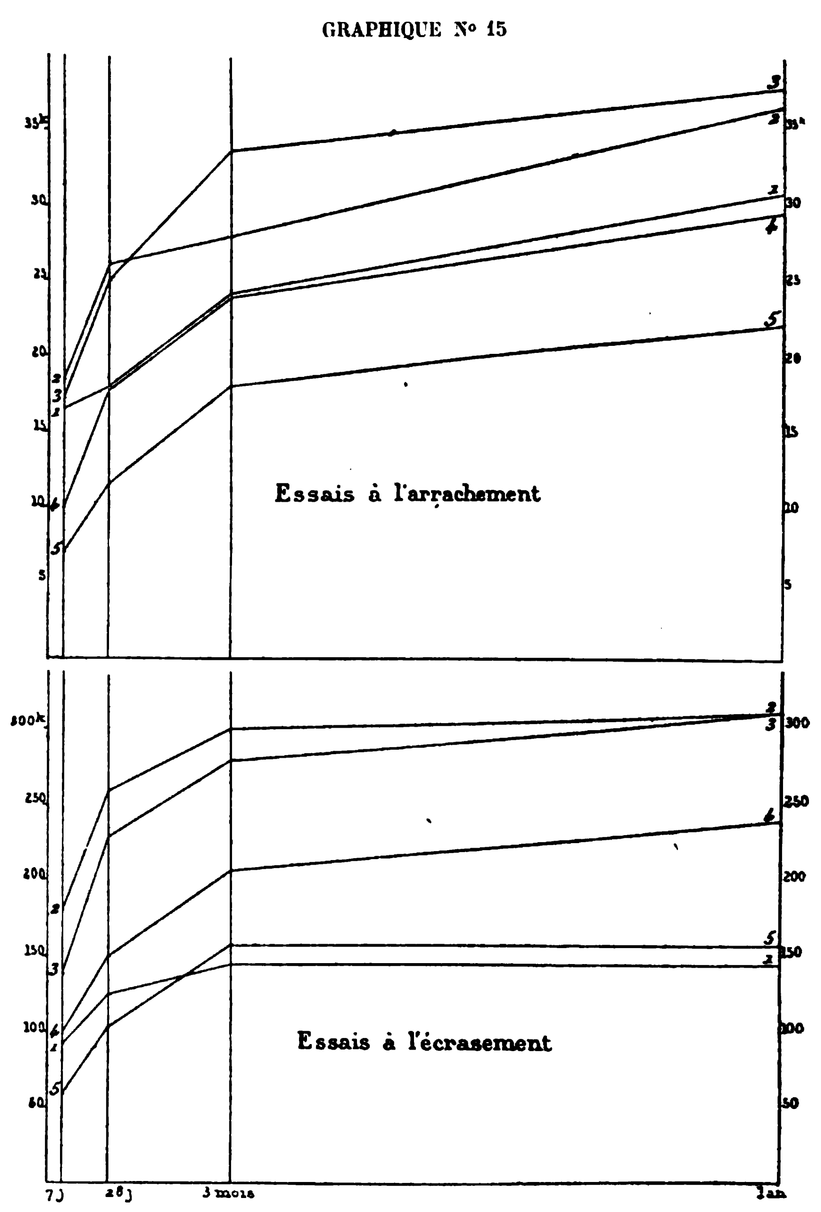


Tableau n° 12. — Influence de la quantité d'eau de gâchage sur la résistance des mortiers (Essais n°s 6 et 8).

Mortier 1 : 3	1 gâché avec	8 0/0	d'eau douce (compression insuffisante).
	2 —	8	—
	3 —	10	—
	4 —	12	—
	5 —	14	—

TABLEAU N° XIII

Influence de la température de l'eau sur la résistance à la traction

Briquettes de 16 centimètres carrés

	Température de l'eau de gâchage	Prise	Résistance par 16 centimètres carrés						
			48 h.	5 jours	15 jours	1 mois	3 mois	6 mois	1 an
			kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
N° 1.	20°	10′	150	287	375	415	381	387	»
	2°	9h45′	28	124	396	412	443	578	»
N° 2.	30°	20′	131	315	»	489	340	406	470
	8°	2h0′	81	293	»	368	615	660	612

Briquettes de 5 centimètres carrés

	Température de l'eau de gâchage	Prise	Résistance par centimètre carré					
			7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	9 mois	1 an
			kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
N° 3.	30°	5′	26,5	36,4	36,9	41,7	38,9	42,2
	15°	35′	28,6	41,0	45,6	52,3	54,1	54,7
	3°	9h,50	23,5	43,0	47,0	46,0	49,0	58,1
N° 4.	30°	0h,30	58,5	27,3	44,2	42,9	»	52,3
	15°	1h,0	44,9	53,0	46,1	47,7	»	42,9
	7°	3h,45	38,6	52,3	52,0	50,4	»	51,2

TABLEAU N° XIV
Influence de la finesse de mouture du ciment sur la résistance des mortiers

Numéros d'ordre	Résidu sur le tamis 324m	900m	4900m	Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Composition du mortier ciment-sable (en poids)	Résistance par centimètre carré en kilogrammes 7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans	Observations
I. *Essais à la traction.* — 1° *Mortiers confectionnés avec du sable naturel tamisé.*																
							kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	
1.	0	1	14	28	»	1 : 0	26,8	41,5	44,0	46,1	49,3	47,4	51,1	39,0	40,0	Mortiers comprimés, conservés dans l'eau douce.
				11	»	1 : 3	13,6	20,1	20,0	23,9	23,2	23,7	25,2	21,5	26,8	
				10	»	1 : 5	5,5	11,2	12,0	12,8	14,0	14,1	12,9	12,8	14,2	
	0	8	35	24	»	1 : 0	30,8	43,0	50,1	51,0	52,7	54,6	56,7	45,0	57,8	
				10	»	1 : 3	12,5	16,7	17,1	19,0	20,1	22,9	22,5	21,5	24,9	
				9	»	1 : 5	4,5	7,7	9,0	9,7	11,6	10,5	10,6	9,8	10,8	
2.	0	0	0	10,0	»	1 : 3	19,0	27,2	27,5	28,9	28,5	29,0	31,6	30,0	»	
	0	0,5	18	10,0	»	1 : 3	13,5	20,8	22,2	22,6	23,2	22,9	25,5	25,8	»	
	2	10	40	10,0	»	1 : 3	9,0	16,5	16,8	16,6	16,7	16,6	19,0	20,0	»	
	4	22	52	10,0	»	1 : 3	7,0	11,2	12,4	12,5	12,7	12,7	14,1	16,0	»	
	0	0	0	9,5	»	1 : 5	9,0	14,1	15,0	15,6	15,5	15,1	15,5	16,2	»	
	2	40	10	9,0	»	1 : 5	2,9	6,6	6,5	8,0	9,1	8,5	8,0	10,2	»	
	4	52	22	9,0	»	1 : 5	3,1	4,9	5,6	7,4	8,1	7,7	8,0	9,6	»	
2° *Mortiers confectionnés avec du sable normal.*																
3.	0	0	25	11,0	2,05	1 : 3	16,2	21,6	28,5	28,6	32,7	30,7	34,2	36,7	»	Mortiers comprimés, conservés dans l'eau douce.
	0	7,5	37	11,0	2,03	1 : 3	13,0	20,0	20,4	22,1	28,1	27,6	31,1	29,2	»	
	3	15,0	42	10,5	1,96	1 : 3	10,9	13,7	21,2	22,0	26,9	29,4	28,5	26,5	»	
	16	30	50	10,5	1,89	1 : 3	8,0	11,6	14,2	15,5	16,2	25,1	24,5	27,7	»	
	0	0	25	15,0	1,86	1 : 3	8,1	14,7	17,5	19,1	21,9	22,4	27,0	28,0	»	Mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier. Conservés dans l'eau douce.
	0	7,5	37	15,5	1,87	1 : 3	4,6	11,9	14,6	15,5	20,0	20,6	26,5	23,7	»	
	3	15	42	14,5	1,82	1 : 3	4,4	7,3	10,6	17,3	18,7	21,1	23,5	22,9	»	
	16	30	50	14,5	1,85	1 : 3	3,6	7,6	10,0	12,2	14,7	20,0	20,5	27,5	»	
	0	0	25	11,0	2,07	1 : 3	15,2	20,0	21,5	23,8	26,4	26,0	32,7	34,5	»	Mortiers comprimés, conservés dans l'eau de mer.
	0	7,5	37	11,0	2,03	1 : 3	9,6	15,7	17,0	19,4	22,7	27,1	31,5	31,3	»	
	3	15	42	10,5	1,98	1 : 3	10,4	13,7	15,1	17,7	19,1	27,5	30,6	29,2	»	
	16	30	50	10,5	1,91	1 : 3	10,6	12,4	13,6	16,5	18,2	26,0	27,9	26,9	»	

II. *Essais à la compression. — Mortiers confectionnés avec du sable normal.*

4.	0	0	10	32,0	2,00	1 : 0	246,7	340,0	420,0	536,7	623,0	623,3	753,3	»	»	Eprouvettes conservées dans l'eau douce.
	0	0	25	28,5	2,12	1 : 0	203,3	366,7	480,0	496,7	613,3	700,0	790,0	»	»	
	0	7,5	37	27,5	2,12	1 : 0	203,3	356,7	460,0	530,0	596,7	700,0	803,3	»	»	
	3	15	42	24,5	2,15	1 : 0	256,7	360,0	442,5	540,0	543,3	623,4	776,7	»	»	
	16	30	50	23,0	2,23	1 : 0	226,7	336,7	433,3	540,0	573,3	676,7	766,7	»	»	
	0	0	10	32,0	2,00	1 : 0	270,0	360,0	400,0	430,0	500,0	416,7	575,0	»	»	Eprouvettes conservées dans l'eau de mer.
	0	0	25	28,0	2,10	1 : 0	260,0	353,3	366,7	420,0	466,7	483,3	530,0	»	»	
	0	7,5	37	26,5	2,12	1 : 0	260,0	353,3	320,0	390,0	516,7	480,0	520,0	»	»	
	3	15	42	24,5	2,14	1 : 0	255,7	300,0	356,7	406,7	432,3	473,3	533,3	»	»	
	16	30	50	23,0	2,23	1 : 0	260,0	360,0	413,3	400,0	553,3	563,3	563,3	»	»	
5.	0	0	10	11,0	2,14	1 : 3	144,7	206,7	240,0	306,7	323,0	340,0	420,0	»	»	Eprouvettes conservées dans l'eau douce.
	0	0	25	11,0	2,09	1 : 3	113,3	145,0	195,0	220,0	226,7	246,7	256,7	»	»	
	0	7,5	37	11,0	2,10	1 : 3	91,7	121,7	168,3	180,0	183,3	225,0	253,3	»	»	
	3	15	42	11,0	2,00	1 : 3	75 0	111,7	121,7	143,3	173,3	176,7	206,7	»	»	
	16	30	50	11,0	1,95	1 : 3	65,0	95,0	101,7	98,3	138,3	125,0	176,7	»	»	
	0	0	10	11,0	2,14	1 : 3	158,3	200,0	213,3	230,0	266,7	280,0	283,3	»	»	Eprouvettes conservées dans l'eau de mer.
	0	0	25	10,5	2,05	1 : 3	110,0	151,7	160,0	160,0	176,7	170,0	233,3	»	»	
	0	7,5	37	11,0	2,07	1 : 3	106,7	135,0	153,3	170,0	183,0	186,7	208,3	»	»	
	3	15	42	11,0	2,00	1 : 3	71,7	121,7	120,0	126,7	130,8	153,3	176,7	»	»	
	16	30	50	11,0	1,95	1 : 3	58,3	78,3	88,3	95,0	93,3	108,3	125,0	»	»	
	0	0	30	10,5	2,11	1 : 3	125,0	180,0	246,7	250,0	240,0	306,7	»	»	»	Eprouv. conserv. dans l'eau douce.
	0	0	30	10,5	2,13	1 : 3	128,3	195,0	240,0	270,0	270,0	353,3	»	»	»	— à l'air.
	7	15	38	10 5	2,09	1 : 3	88,3	133,3	173,3	186,7	206,7	250,0	»	»	»	Eprouv. conserv. dans l'eau douce.
	7	15	38	10,5	2,11	1 : 3	101,7	150,0	210,0	230,0	233,3	320,0	»	»	»	— à l'air.

GRAPHIQUE N° 16

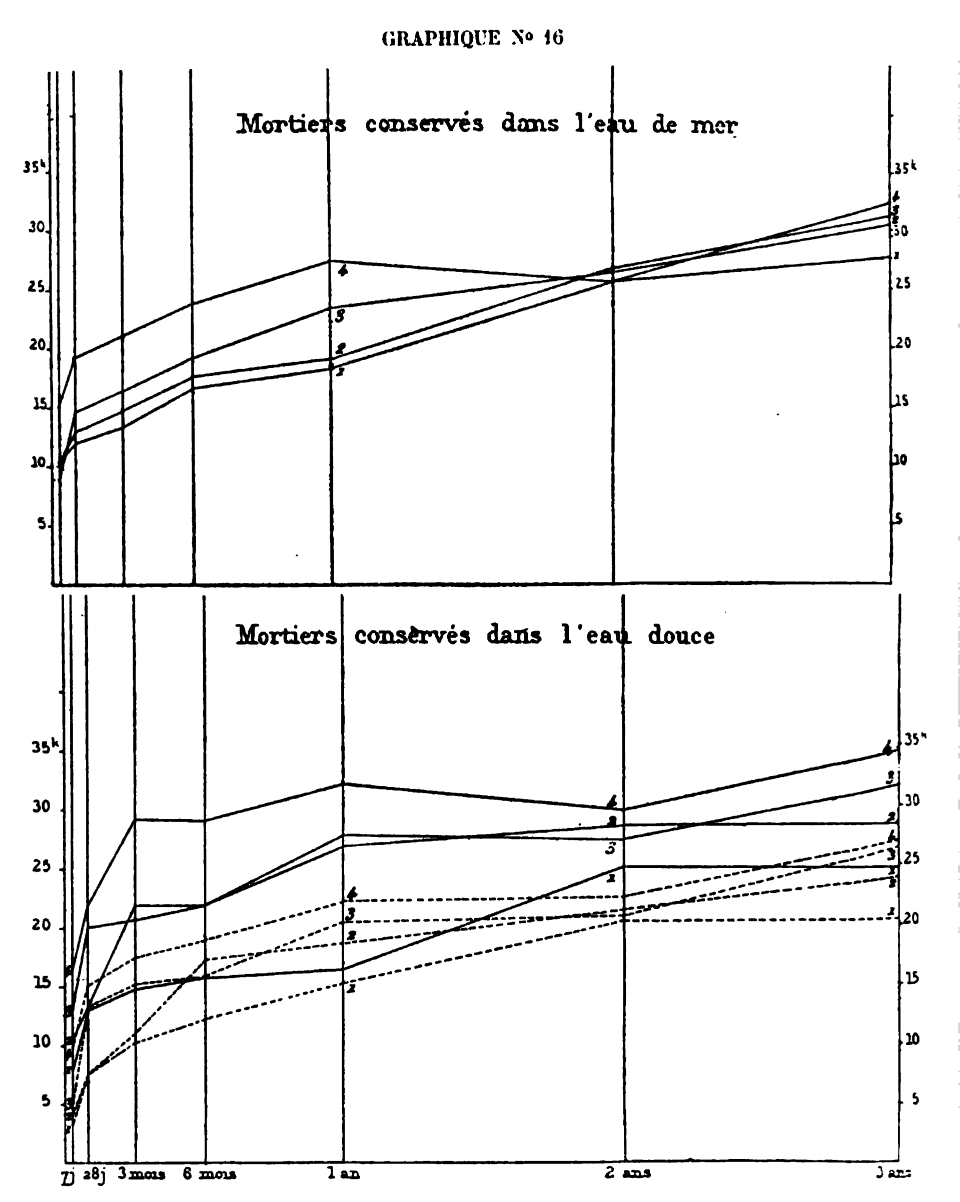


Tableau n° 14. — Influence de la finesse de mouture du ciment sur la résistance du mortier. (Essai n° 3.)

Ciment n° 1, résidu sur le tamis de 324^{m}16 =	900^{m}30 =	4900^{m}50	
n° 2.	— 3	— 15	— 42
n° 3.	— 0	— 7.5	— 37
n° 4.	— 0	— 0	— 25

Mortiers comprimés ——— Mortiers non comprimés ------

GRAPHIQUE N° 17

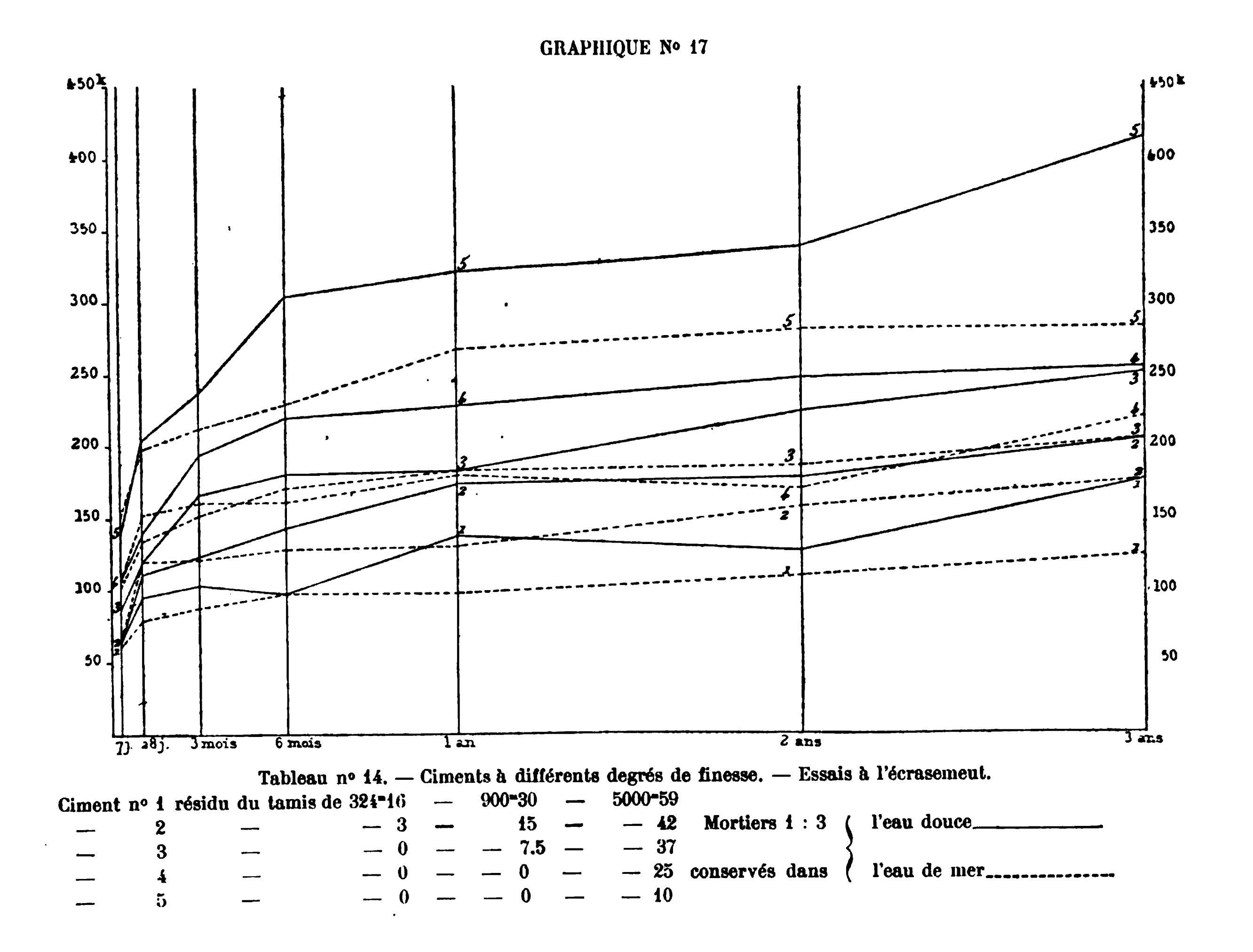


Tableau n° 14. — Ciments à différents degrés de finesse. — Essais à l'écrasement.

Ciment n° 1	résidu du tamis de 324m16	—	900m30	—	5000m59			
— 2	—	— 3	—	15	—	— 42	Mortiers 1 : 3	l'eau douce ————
— 3	—	— 0	—	— 7.5	—	— 37		
— 4	—	— 0	—	— 0	—	— 25	conservés dans	l'eau de mer - - - - -
— 5	—	— 0	—	— 0	—	— 10		

TABLEAU N° XV

Influence de la nature du sable sur la résistance des mortiers

	Désignation du sable	Résistance par centimètre carré à la traction								Observations
		7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	5 ans	
		kg.	kg.	kg.	kg	kg.	kg.	kg.	kg.	
1	Gros gravier, tout venant. Poids du litre : 1 550 gr.	10,1	13,0	17,1	20,3	19,1	18,9	22,5	22,4	Mortiers 1 : 3 Briquettes de 16 cen. carrés conservées dans l'eau de mer
1	Même sable passé aux tamis de 60 et 120 mailles par c. c. Poids du litre : 1 425 gr.	10,5	13,2	14,0	17,1	21,6	20,0	18,7	20,2	
1	Sable de rivière passé aux tamis de 60 et 120 mailles Poids du litre : 1 385 gr.	9,0	10,5	11,8	13,4	15,6	12,5	13,2	18,5	
1	Même sable passé aux tamis de 13 et 60 mailles. Poids du litre : 1 390 gr	7,7	9,5	11,5	16,0	14,2	13,4	13,6	12,5	
1	Même sable passé aux tamis de 120 et 324 mailles. Poids du litre : 1 390 gr..	7,6	8,7	10,9	12,5	13,6	12,0	14,0	14,4	
1	Sable de mer très fin. Poids du litre : 1 450 gr. . .	7,0	8,5	11,3	13,6	13,0	13,6	13,4	12,5	
2	Sable naturel . . . . . (Sables quartzeux passés aux tamis de 60 et 120 mailles)	13,1	17,4	15,5	18,4	19,0	20,5	»	22,2	Briquettes de 5 c. c. Mortier 1 : 3 Briquettes conservées dans l'eau douce
2	— artificiel	17,0	21,1	25,2	24,9	26,9	28,0	»	33,5	
3	— naturel	14,6	20,7	23,4	23,0	21,7	23,0	»	21,7	
3	— artificiel	16,0	23,1	29,2	32,0	32,2	31,9	»	32,5	
4	— naturel	14,6	18,2	17,4	19,2	20,0	20,1	»	22,7	
4	— artificiel	18,6	24,0	26,7	32,0	31,8	31,9	»	32,7	

TABLEAU N° XV (*suite*)

	Désignation du sable		Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré Mortier 1 : 3 (Éprouvettes conservées dans l'eau douce) — à la traction							à la compression						
					7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans
					kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
5	Sable normal. Quartz concassé	tous ces sables ont été passés aux tamis de 60 et 120m	10,5	2,14	13,5	23,2	26,4	28,9	34,6	35,0	33,6	125,0	195,0	223,3	266,7	286,7	306,7	285,0
	Sable de mer. Quartz pur		9,5	2,21	13,2	18,4	18,5	24,0	26,4	28,9	27,7	138,3	190,0	240,0	256,7	310,0	260,0	340,0
	Sable de mer. Quartz pur		9,5	2,22	14,4	19,9	23,2	24,5	22,0	26,6	25,5	135,0	196,7	243,3	246,7	270,0	346,7	291,0
	Sable de mer. Quartz avec 20 % environ de carbonate de chaux		10,5	2,13	12,3	17,5	20,6	19,5	21,6	26,6	27,6	128,3	180,0	196,7	220,0	250,0	283,3	250,0
	Sable de mer très fin (Sable des Dunes)		11	2,09	11,2	17,4	19,9	24,1	25,4	29,9	»	95,0	118,3	178,3	170,0	210,0	233,3	»
	Sable de mer fin, contenant environ 50 % de débris de coquillages		11	1,98	12,4	15,4	15,5	21,7	24,0	30,2	»	95,0	115,0	125,0	138,3	160,0	173,3	196,7
6	Sable normal	tous ces sables ont été passés aux tamis de 60 et 120m	10,5	2,15	17,1	24,7	29,6	29,0	37,2	37,5	36,8	135,0	200,0	245,0	250,0	293,3	363,3	316,7
	Sable de mer. Quartz pur		9,5	2,23	17,7	17,9	23,0	20,5	28,1	29,0	28,8	155,0	200,0	250,0	233,0	280,0	320,0	310,0
	Sable de mer. Quartz à peu près pur		9,5	2,20	17,2	19,9	22,6	21,5	23,9	31,0	32,5	150,0	196,7	256,7	286,7	313,3	370,0	366,7
	Sable de mer. Quartz pur. Grains arrondis		9,5	2,21	16,5	20,0	20,6	23,7	26,2	28,4	30,6	168,7	230,0	286,7	290,0	326,7	350,0	316,7
	Sable de Seine, un peu argileux		9,5	2,21	»	»	»	»	»	»	»	186,7	246,7	276,7	290,0	295,0	360,0	320,0
7	Sable normal	Quartz concassé	10	2,22	21,0	28,4	34,9	34,7	40,0	40,0	41,7	141,7	220,0	258,3	320,0	350,0	366,7	333,3
	Gros sable		10	2,25	18,1	24,1	29,7	33,7	36,9	40,7	37,0	145,0	228,3	273,3	303,3	356,7	380,0	336,7
	Sable très fin		11,5	2,14	16,4	21,2	26,9	30,6	35,1	38,7	34,7	118,3	193,3	215,0	226,7	246,7	276,7	290,0
	Sable normal	Quartz concassé (mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier).	15	2,11	9,6	16,9	21,9	21,6	28,6	30,5	28,2	46,7	108,3	138,3	181,7	200,0	223,3	220,0
	Gros sable		14	2,10	11,5	20,5	23,1	24,1	31,6	29,7	28,1	55,3	»	138,3	173,3	220,0	255,0	220,0
	Sable très fin		20	2,01	8,2	14,1	19,4	22,0	26,9	28,6	25,7	32,0	68,3	95,0	115,0	123,3	155,0	133,3

GRAPHIQUE N° 18

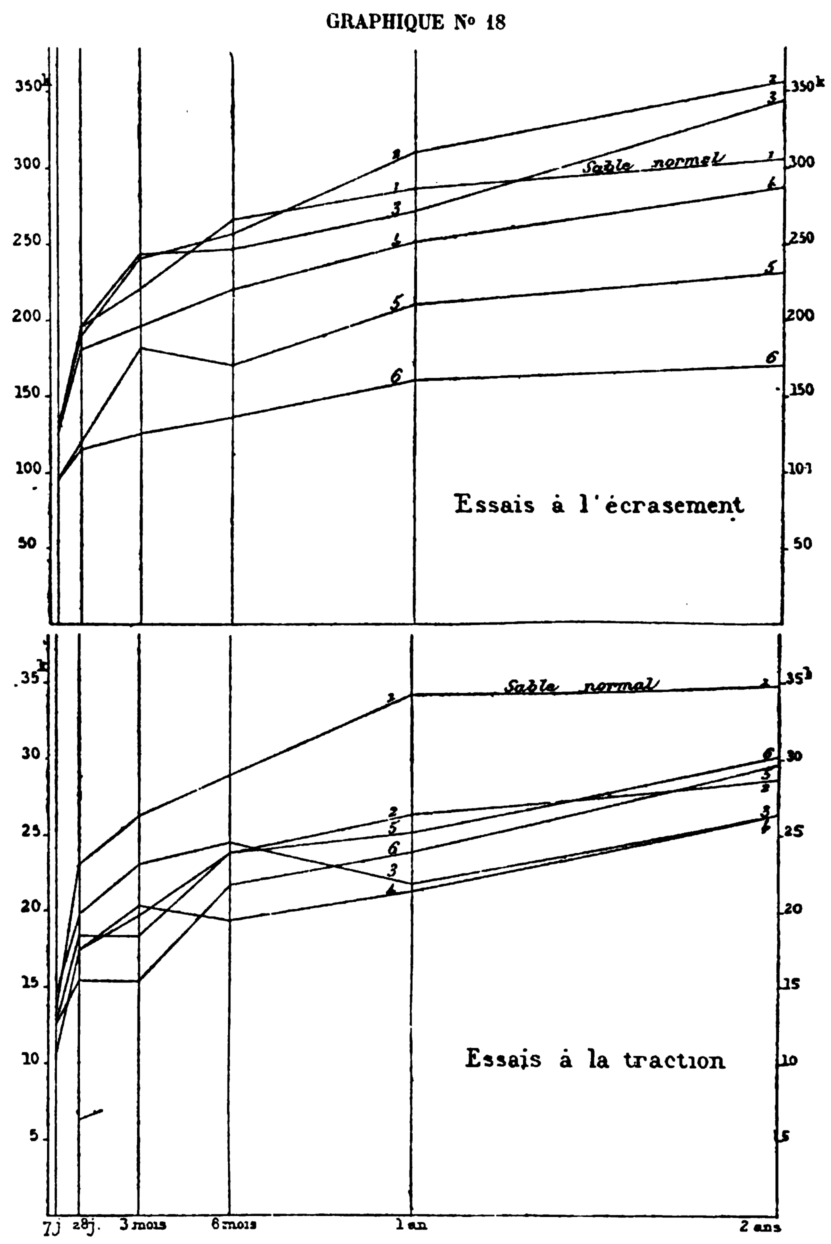


Tableau n° 15. — Influence de la nature du sable sur la résistance des mortiers. (Essai n° 5).

Sable n° 1 sable normal
— 2 sable de mer quartzeux
— 3 — —
— 4 — — un peu calcaire
} sables passés au tamis de 60 et 120 mailles.
— 5 sable de mer, très fin, siliceux.
— 6 — — calcaire.

TABLEAU N° XVI

Influence du mode de conservation du ciment en poudre sur la résistance

N°s d'ordre des essais	Désignation des ciments	Résistance par centimètre carré à la traction																
		Ciment pur								Mortier 1 : 3								
		7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	
1	Ciment conservé en baril pendant un mois	28,6	41,0	45,6	52,3	54,7	54,0	54,0	57,4	»	»	»	»	»	»	»	»	à l'air
		30,0	**43,5**	**57,6**	**57,1**	**59.2**	**31,1**	**48,0**	**34,1**	»	»	»	»	»	»	»	»	
	Même ciment conservé en baril pendant 8 mois	29,6	38,2	46,6	53,1	50,5	51,1	»	54,2	»	»	»	»	»	»	»	»	
		30,8	**46,5**	**61,5**	**55,6**	**62,1**	**56,0**	»	**26,0**	»	»	»	»	»	»	»	»	
2	Ciment conservé en sac pendant deux mois (altéré)	23,7	33,4	42,2	48,0	48,7	45,5	38,9	48,4	7,9	11,5	13,4	15,5	16,7	17,0	18,9	20.2	
		18,5	29,2	42,2	48,6	63,7	52,4	»	58,5	**7,4**	11,7	18,3	23,4	31,1	36,2	»	48,5	
3	Ciment essayé : 1° le jour même de la mouture	33,9	43,7	48,2	54,0	56,7	57,0	55,9	»	14,6	23,6	25,1	29,9	30,7	34.5	37,0	»	
		31,0	**45,4**	**55,2**	**58,6**	**17,1**	**55,4**	**61,0**	»	**13,2**	**17,6**	**22,5**	**25,2**	**25,1**	**28,1**	**28,9**	»	
	2° après 1 mois de séj. en sac	**32,1**	**45,2**	**57,9**	**60,2**	**43,1**	**65,1**	**46,1**	»	**13,4**	**17,5**	**22,5**	**23,6**	**26,5**	**29,9**	**35,6**	»	
	3° après 3 m. de séjour en sac	**23,0**	**39,8**	**56,0**	**58,4**	**62,4**	**79,5**	**73.6**	»	**9,0**	**15,0**	**22,1**	**22,9**	**23,9**	**32,0**	**32,5**	»	
	4° après 3 m. de séjour en sac	**19,0**	**35,6**	**48,4**	**54,1**	**55,6**	**57,5**	63,9	»	**12,5**	**18,0**	**23,9**	**26,1**	27,0	**30,9**	**34,4**	»	
	5° après 5 m. de séjour en sac	16,6	29,1	37,6	44,4	40,4	42,4	43,5	»	7,9	15,2	23,0	25,2	30.5	32,9	32,7	»	
		21,4	**32,0**	**40,9**	**41,5**	**56,6**	48,6	**41,6**	»	**6,5**	**14,2**	**19,5**	**24,5**	**26,1**	**28,9**	**30,1**	»	
4	Ciment conservé en sac pendant un an, en bon état	28,2	37,6	40,6	42,1	42,0	42,4	46,7	»	13,6	19,0	25,1	30,9	30,7	33,6	37,2	»	
		25,7	**38,0**	**53,5**	**56,5**	**54,1**	**58,5**	**48,2**	»	**12,2**	**17,9**	**23,0**	**24,4**	**27.6**	**30,6**	**30,8**	»	
5	Ciment conservé en sac, pris en grumeaux	20,0	33.8	41,7	39,5	47.0	46,2	52,1	»	12,4	19,8	24,1	27,5	32,2	34,1	35,0	»	
		23,5	**38,0**	**46,7**	**48,6**	**52,0**	**24,1**	**45,7**	»	**12,2**	**17,7**	**22,5**	**25,2**	**28,7**	**29,5**	33,2	»	
6	Ciment essayé : 1° le jour de la mouture	33,5	45,1	50,0	54,5	54,1	50,4	»	»	10,9	20,4	26,0	33,2	33.5	33,5	»	»	
		31,5	**41,0**	**45,3**	**50,8**	**49,7**	**38,1**	»	»	**12,1**	11,1	**21,2**	**24,1**	**25,2**	**30,6**	»	»	
	2° après 3 m. de séjour en sac	24.0	39,8	48,2	49,0	51,6	48,0	»	»	14,0	23,2	26,0	31,7	33,4	36,1	»	»	
		28,1	**39,5**	**45,1**	**29,9**	**27,5**	**17,5**	»	»	**11,9**	**28,8**	**20,6**	**23,9**	**25,5**	27,5	»	»	
	3° après 6 m. de séjour en sac	15,7	29,1	39,9	42,2	46,7	52,1	»	»	13,4	21,1	29,2	35,4	35,7	»	»	»	
		22,1	**39,5**	**48,9**	**45,1**	**15,1**	**27,8**	»	»	**10,2**	**16,5**	**31,5**	**23,2**	**24,9**	»	»	»	
	4° après 9 m. de séjour en sac	9,1	21,7	33,6	33,6	49.5	»	»	»	12,2	18,5	30.5	32,0	31,0	»	»	»	
		7,0	**15,4**	**26,0**	**29,9**	**38,7**	»	»	»	**4,9**	**13,1**	**19,1**	**20,6**	**27,5**	»	»	»	
7	Grumeaux de ciments réduits en poudre	19,1	26,9	40,2	36,7	39,3	»	»	»	11,1	17,2	26,0	26,9	32,0	»	»	»	

NOTA. — Les résistances des briquettes conservées dans l'eau douce sont imprimées en *caractères ordinaires* et les résistances des briquettes conservées à l'eau de mer sont imprimées en *caractères noirs*. — Les mortiers de l'échantillon n° 2 ont été confectionnés avec du sable naturel. Pour les autres échantilons on a employé le sable normal.

TABLEAUX N° XVII

Résistance des mortiers conservés à l'air

Mortier 1 : 3. — Sable normal. Mortiers comprimés

N° d'ordre des échantillons	Résidu sur le tamis de			Quantité d'eau de gâchage	Densité des éprouvettes	Résistance par c. c. à la traction				
	324	900	4900			7 jours	28 jours	3 mois	1 an	2 ans
						kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
1	0	6	36	11	2,02	10,4	15,7	22,5	29,7	39,5
2	0	3	26	11	2,07	11,9	18,5	32,1	42,1	46,6
3	0	5	32	11	2,03	9,2	15,6	26,1	36,0	45,1
4	0	2	25	11	2,05	9,1	19,1	23,0	36,2	55,4
5	0,5	5	32	11	2,00	9,7	17,0	26,0	48,7	56,0
6	0,5	6	38	11	2,03	10,2	18,6	22,4	41,6	45,5
7	0	5	34	11	2,03	8,5	20,0	21,3	29,2	36,8
8	0	6	30	10,5	2,09	14,3	23,7	32,5	48,5	58,3
9	0	5	25	10,5	2,09	11,9	20,5	35,8	45,2	57,2
10	0	7,5	35	10,5	2,11	13,8	23,0	31,5	40,9	43,5
11	0,5	13,5	38	10,5	1,99	7,9	14,0	23,6	41,3	45,5
12	0	0	30	10,5	2,09	10,3	19,0	21,5	32,2	45,0
13	7	15	38	10,5	2,08	10,9	20,0	20,3	38,2	45,3
14	8	24	48	11	2,12	16,7	23,4	32,5	47,4	»
15	0	8	28	11	2,19	16,4	23,7	29,4	49,0	»
16	0	5	18	11	2,19	14,0	23,5	32,9	47,6	57,6
17	0	4	32	11	2,15	12,2	23,4	32,7	46,2	51,0
18	2	15	37	11	2,14	11,6	23,5	30,6	44,4	»
19	0,5	8	34	10,5	2,14	15,4	29,9	35,6	58,7	»
20	0,5	10	32	10,5	2,14	11,6	19,9	33,6	57,3	»
21	0	4,5	28	10,5	2,16	11,7	23,2	32,0	54,3	»
22	0	13	32	11	2,14	13,9	23,1	28,9	43,2	»
23	7,5	16	38	11	2,14	13,4	22,6	33,4	»	»

TABLEAU N° XVIII

Composition et résistance de quelques échantillons de ciments naturels ou mixtes, de ciments de grappiers et de laitier.

1° Composition chimique :

Désignation des ciments		Sable siliceux	Silice	Alumine	Oxyde de fer	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Perte au feu	Produits non dosés	Total
Ciments naturels	prise lente . .	»	21,80	8,32	4,08	54,10	3,06	3,70	5,10	»	100,16
	prise demi-lente.	»	22,20	8,32	3,98	54,40	2,01	3,60	5,10	0,39	100,00
Ciments mixtes	prise lente . .	2,50	22,80	8,89	3,31	53,40	0,78	1,40	6,80	0,12	100,00
	Id. . .	»	22,30	10,02	3,65	55,83	1,80	2,57	3,75	0,08	100,00
	Id. . .	»	21,30	7,70	3,20	55,10	2,23	3,08	7,20	0,19	100,00
	prise demi-lente.	1,25	23,25	8,59	3,31	55,40	0,80	1,50	5,75	0,15	100,00
	Id. . .	»	25,90	9,07	2,93	55,00	1,72	2,20	3,00	0,18	100,00
	Id. . .	»	20,90	8,55	2,98	55,20	2,60	3,99	5,57	0,21	100,00
Ciments de grappiers . .		»	27,30	2,25	1,15	60,58	1,98	0,85	5,80	0,09	100,00
		»	26,70	2,44	1,36	62,70	1,14	0,56	5,00	0,10	100,00
		»	27,50	6,46	3,14	52,50	1,16	0,96	7,80	0,48	100,00
		»	26,30	1,89	1,01	62,55	0,72	1,09	6,90	»	100,46
		1,35	22,15	8,09	3,31	54,90	1,04	1,10	8,10	»	100,04
		»	24,10	3,50	2,00	55,10	0,40	0,55	14,20	0,15	100,00
Ciments de laitier . . .		»	25,60	14,57	1,73	44,96	4,28	1,61	6,70	0,55	100,00
		»	24,80	19,13	2,67	36,60	6,76	2,10	7,50	0,44	100,00
		»	24,60	13,46	0,84	50,22	2,65	2,70	5,40	0,13	100,00
		»	24,90	13,46	2,83	50,40	1,20	1,10	6,45	»	100,34
		»	24,30	13,85	1,15	49,50	2,16	1,86	6,90	0,28	100,00
		»	27,45	14,65	1,75	46,20	1,86	0,72	7,00	0,37	100,00
		»	25,20	15,23	0,77	50,00	1,35	0,72	6,50	0,23	100,00
		0,50	29,70	11,36	1,64	48,20	2,20	3,80	2,60	»	100,00

TABLEAU N° XIX

2° Essais de résistance :

Désignation du ciment		Poids du litre non tassé	Résidu sur le tamis de 324 m.	900 m.	4900 m.	Durée de prise à l'eau douce	Résistance par centimètre carré — à la traction — ciment pur — 7 jours	ciment pur — 28 jours	mortier 1 : 3 — 7 jours	mortier 1 : 3 — 28 jours	à la compression — ciment pur — 7 jours	ciment pur — 28 jours	mortier 1 : 3 — 7 jours	mortier 1 : 3 — 28 jours
						h.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg	kg.
Ciment naturel (Isère)	prise lente . . .	1190	4	14	30	6,00	16,0	16,2	6,5	10,0	111,0	133,0	»	»
	prise demi-lente .	1085	2	9,5	21	3,10	22,5	20,7	10.5	11,0	130,0	163,3	75,0	95,0
Ciments mixtes (Isère)	prise lente . . .	1065	0	4	32	7,50	25,2	35,6	11,0	17 1	»	»	»	»
	Id. . . .	1250	4	12	36	7,00	13,5	15,1	6,5	11,9	»	»	36,7	65,0
	Id. . . .	970	1	11	30	6,50	8,7	15,2	5,1	11,7	65,0	115,0	37,0	56,7
	prise demi-lente.	1135	0	4	33	1,20	19,7	21,1	8,0	12,2	»	»	»	»
	Id. . . .	1200	9	30	49	0,50	24,7	24,0	5,5	8,2	»	»	31,7	45,0
	Id. . . .	930	0,5	12	32	0,40	10,5	14,1	6,7	10,6	100,0	161,7	36,0	78,3
Ciments de grappiers. . .		1010	0	0	10	14,00	17,6	22,6	12,2	22,2	165,0	245,0	120,0	168,[illegible]
		1010	0	0	10	15,00	11,1	21,0	10,5	17.5	»	»	»	»
		1055	0	0,5	11,5	10,00	13,5	24,9	10,9	18,5	105,0	202,0	123,0	175,[illegible]
		1070	0	0	9,5	12,00	21,0	29,0	13,0	23,6	»	»	»	»
		1020	1,5	7,5	18	11,00	12,4	22,1	11,4	19,1	»	»	»	»
		955	0	5	28	»	11,0	22,1	5,7	14,0	»	»	»	»
		885	5	16	36	»	9,9	11,8	4,9	8,6	»	»	»	»
Ciments de laitier		925	0	1,5	14	2,10	16,1	28,6	17,6	28,2	185,0	246,7	148,7	200,0
		925	0	1,5	14	10,50	14,2	20,0	11,0	18,9	»	»	»	»
		900	1,5	4	14	9,50	18,7	25,5	18,1	25,2	141,7	210,0	118,3	166,7
		1105	0	2	14	3,40	17,9	21,9	16,1	26,6	200,0	233,3	115,0	155,0
		840	0,5	4	15	11,40	26,9	33,0	14,7	24,4	»	»	»	»
		810	0	1,5	7	4,10	11,5	21,5	21,6	31,0	»	»	»	»
		895	2	4,5	19	8,00	24,1	36,3	16,2	27,1	»	»	»	»
		890	1	2	11	8,00	25,1	34,2	14,2	25,5	»	»	»	»
		915	0	1	5	20,00	»	»	»	»	155,0	210,0	42,0	90,7

TABLEAU N° XX

Ciments à prise rapide

Provenance du ciment	Poids du litre non tassé	Résidu sur le tamis de			Prise		Quantité d'eau de gâchage	Composition du mortier	Résistance par centimètre carré à la traction								Eau dans laquelle les briquettes ont été conservées
		324 m.	900 m.	4900 m.	eau douce	eau de mer			7 jours	28 jours	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	
									kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg	
Vassy.	685	0	6,5	23	3′	8′	48	pur	14,6	14,6	20,4	20,1	23,2	23,2	23.6	25,5	eau douce
							14	1 : 3	3,7	5,0	8,1	9.6	15,7	18,7	18,0	21,6	
							48	pur	17,5	24,6	22,5	20,5	11,0	4,5	2,0	»	eau de mer
							14	1 : 3	7,2	11,0	14,7	16,6	14,5	15,5	12,6	»	
Isère.	1000	10	16	30	5′	12′	33	pur	13,5	14,7	16,1	15,4	39,2	44,2	35,5	37,2	eau douce
							12	1 : 3	3,3	4,7	6,6	10,1	9,7	13,0	14,4	14,9	
							32	pur	16,2	24,5	25,5	20,6	35,7	18,0	15,0	24,9	eau de mer
							12	1 : 3	4.7	7,0	9,0	10,9	16.4	19,2	18,6	20,6	
Vassy.	698	1,5	8	23	6′	9′	49	pur	12,2	11,5	16,0	20,8	23,9	24,7	28,5	»	eau douce
							14	1 : 3	5,1	6,1	10,4	10,8	14,0	17,0	22,1	»	
Vassy.	715	1,5	10	28	7	10′	48	pur	11,8	12,5	16,0	21,5	27,2	25,4	32,1	»	eau de mer
							14	1 : 3	5,2	6,8	10,4	10,0	15,7	15,4	24,0	»	
Pouilly.	785	10	15	32	7′	15′	38	pur	11,8	16,6	22.2	28,4	26,4	28,0	29,1	»	eau douce
							14	1 : 3	4,5	9,9	18,1	24,0	27,6	29,9	29,5	»	
							37	pur	15,5	22,4	29,6	33,9	21,2	25,1	23,9	»	eau de mer
							14	1 : 3	5,0	12,8	14,1	25,5	27,0	29,2	31,6	»	
Isère.	980	0	2,5	40	6′	10′	30	pur	13,2	17,7	23,2	25,7	25,4	30,7	»	»	eau douce
							12	1 : 3	7,6	12,2	23,2	28,7	37,2	34,0	»	»	
							30	pur	17,1	23,7	28,0	34,1	39,4	35,5	»	»	eau de mer
							12	1 :3	7,6	12,6	20,9	24,1	26,1	32.1	»	»	
Vassy.	685	2	12	28	14′	35′	40	pur	9,7	11,9	11,0	10,7	15,2	»	»	»	eau douce
							14	1 : 3	11,4	15,6	20,0	19,4	21,9	»	»	»	
							40	pur	20,7	25,4	20,0	15,4	12,2	»	»	»	eau de mer
							14	1 : 3	19,9	30,5	33,4	31,7	28,1	»	»	»	
							14	pur	16,7	16,0	16,2	18,4	19,1	»	»	»	à l'air

TABLEAU N° XXI

Rendements en mortier obtenus avec des sables de différentes grosseurs et vides contenus dans les mortiers

		Ciment de Boulogne														Chaux du Teil							
		Mortiers non comprimés							Mortiers gâchés à consistance ordinaire							Mortiers gâchés à consistance ordinaire							
Désignation des sables	Dosage du ciment pour 1 litre de sable (en gr.).	Quantité d'eau de gâchage (en cent. cubes)	Volume du ciment (en cent. cubes)	Volume absolu	Différence	Volume de l'eau en excès (en c. c.)	Volume total du vide du mortier	Vide 0/0 du volume du mortier	Quantité d'eau de gâchage	Volume du mortier	Volume absolu	Différence	Volume de l'eau en excès	Volume total du vide	Vide 0/0 du volume du mortier	Dosage de la chaux pour 1 l. de sable	Quantité d'eau de gâchage	Volume du mortier	Volume absolu	Différence	Volume de l'eau en excès	Volume total du vide	Vide 0/0 du volume du mortier
	gr.	c. c.	c. c.	c. c.	c. c.	c. c.	c. c.																
	350	122	812	693,5	118,5	39,5	158	19	310	990	881,5	108,5	227,5	336,0	34	250	340	1010	886	124	290	414	41
Quartz concassé N° 2 .	450	157	840	761,5	78,5	44,5	123	14	330	1040	934,5	105,5	217,5	323,0	31	350	390	1060	972	88	320	408	38
	550	187	848	824,5	23,5	49,5	73	9	350	1080	987,5	92,5	212,5	305,0	28	450	420	1140	1038	102	330	432	38
Poids du litre : 1200 gr.	650	214	914	884,5	29,5	51,5	81	9	350	1120	1020,5	99,5	187,5	287,0	25	550	480	1230	1134	96	370	406	37
Vide : 544 c. cubes . .	750	225	954	928,5	25,5	37,5	63	7	350	1150	1053,5	96,5	162,5	259,0	22	650	500	1270	1190	80	370	450	35
Sable fin.	850	238	994	974,5	19,5	27,5	45	5	350	1200	1086,5	113,5	137,5	251,0	21	»	»	»	»	»	»	»	»
	1000	250	1054	1036	18,0	»	18	2	380	1270	1166,0	104,0	130,0	234,0	18	»	»	»	»	»	»	»	»
	350	105	834	714,5	119,5	22,5	142,0	17	250	940	859,5	80,5	167,5	248,0	26	250	315	950	899	51	265	316	33
Quartz concassé N° 3 .	450	135	834	777,5	56,5	22,5	79,0	9	250	980	892,5	87,5	137,5	225,0	23	350	350	985	930	53	280	335	34
Poids du litre : 1300 gr	550	154	844	829,5	14,5	16,5	31,0	4	280	1040	955,5	84,5	142,5	227,0	21	450	400	1080	1056	30	310	340	31
Vide : 506 c. cubes . .	650	175,5	904	884,0	20,0	13,0	33,0	3	310	1096	1028,5	67,5	147,5	215,0	19	550	400	1160	1092	68	290	358	31
Sable moyen (normal) .	750	195	944	936,5	7,5	7,5	15,0	2	315	1100	1056,5	43,5	127,5	171,0	15	650	500	1275	1228	47	370	418	35
	850	212,5	994	987,0	7,0	»	7,0	1	320	1140	1094,5	45,5	107,5	153,0	13	»	»	»	»	»	»	»	»
	1000	240	1100	1064,3	36,0	»	26,0	2	350	1220	1174,0	46,0	100,0	146,0	12	»	»	»	»	»	»	»	»
	350	105	850	744,5	105,5	22,5	128,0	16	150	970	799,5	170,5	77,5	248,0	26	250	220	960	834	126	270	396	41
Quartz concassé N° 5. .	450	135	850	807,5	42,5	22,5	65,0	8	180	970	852,5	117,5	67,5	185,0	19	350	250	980	900	80	180	260	27
Poids du litre : 1380 gr.	550	154	880	859,5	20,5	16,0	36,5	4	200	970	905,5	64,5	62,5	127,0	13	450	310	1020	996	24	220	244	21
Vide : 477 c. cube . .	650	182	920	914,0	6,0	13,0	19,0	2	240	990	978,5	11,5	77,5	89,0	9	550	360	1100	1082	18	250	264	24
Gravier moyen. . . .	750	187,0	960	958,5	1,5	»	1,5	1	275	1060	1046,5	13,5	87,5	101,0	9	650	420	1200	1178	22	290	312	26
	850	204,0	1010	1008,5	1,5	»	»	»	290	1100	1094,5	5,5	77,5	83,0	8	»	»	»	»	»	»	»	»
	1000	230,0	1088	1084,0	2,0	»	»	»	315	1176	1169,0	7,0	65,0	72,0	6	»	»	»	»	»	»	»	»

TABLEAU N° XXII

Essais faits sur des échantillons de sable pris sur les chantiers

Désignation des sables	Densité du sable	Sable sec — Poids du litre non tassé	Sable sec — Volume du vide	Sable humide Poids du litre	Poids moyen de 1 litre de sable	Dosage du ciment pour 1 litre de sable (poids moyen)	Quantité d'eau de gâchage pour 100 gr. de ciment
		gr.	c. c.	gr.	gr.	c. c.	c. c.
Sable de mer très fin, passant complètement à travers le tamis n° 40	2,63	1435	455	1193	1329	451	60
Sable de rivière passant à travers le tamis n° 6 et restant sur le tamis n° 30. . .	2,66	1435	461	1196	1315	577	40
Sable de mer passant à travers le tamis n° 6	2,63	1450	449	1176	1313	519	45
Même sable, partie passant à travers le tamis n° 12 et restant sur le tamis n° 30.	2,61	1405	460	1232	1318	590	40
Sable de mer passant à travers le tamis n° 6	2,64	1535	420	1252	1393	533	40
Même sable, les grains fins passants à travers le tamis n° 30, étant éliminés .	2,64	1480	440	1314	1397	568	40
Sable de mer, grains très arrondis, passant à travers le tamis n° 2.	2,61	1570	400	1334	1452	505	40
Même sable, grains passant à travers le tamis n° 6 et restant sur le tamis n° 80.	2,61	1550	407	1370	1460	540	38
Sable de Seine, passant à travers le tamis n° 12.	2,53	1445	430	1140	1292	492	45
Même sable, les grains fins passant à travers le tamis n° 30 étant éliminés . .	2,54	1430	438	1238	1334	559	40
Gravier de Seine, passant à travers le tamis n° 2 et restant sur le tamis n° 12. . .	2,58	1450	440	1382	1416	587	40
Sable de mer très fin, passant complètement à travers le tamis n° 30	2,67	1335	500	1050	1192	490	60
Sable de mer très fin, contenant une grande quantité de débris de coquillages, passant complètement à travers le tamis n° 30.	2,67	1280	479	1080	1180	435	68
Sable de mer, passant à travers le tamis n° 30.	2,68	1420	471	1187	1303	520	50
Sable de rivière, assez fin mais contenant une petite quantité de gros gravier . .	2,63	1530	419	1340	1435	503	45
Même sable, le gravier étant éliminé, sable passé au tamis n° 30	2,63	1400	468	1245	1322	531	50

TABLEAU N° XXIII

Résistance des mortiers de ciment Portland à différents dosages

Première série : Sable normal. Mortiers comprimés, conservés dans l'eau douce

Désignation des ciments	Dosage du ciment pour 1m³ de sable (en kilogramme)	Quantité d'eau de gâchage (pour 100 k. de mortier) (en litres)	Volume du mortier (en m³)	Densité des éprouvettes	Résistance par centimètre carré (en kilogrammes) — à la traction — 7 jours	28 jours	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	à la compression — 7 jours	28 jours	1 an	2 ans	3 ans	4 ans
					kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.	kg.
Ciment n° 1	150	9,0	»	»	»	»	»	»	»	»	13,0	18,7	25,3	32,0	35,3	38,7
Poids du litre : 1330	250	9,5	»	»	4,6	9,0	13,4	14,3	16,5	18,7	40,3	48,7	62,0	71,7	88,3	90,0
Résidu : tamis de 900m : 10,5	350	9,5	»	»	8,2	12,6	19,1	19,8	21,6	22,5	49,7	83,3	141,7	145,0	178,3	175,0
» » 4900m : 33,0	450	10,0	»	»	11,2	18,9	29,0	27,0	32,7	33,7	98,3	135,0	208,3	210,0	240,0	245,0
	550	10,5	»	»	13,9	22,5	32,0	32,0	35,0	38,1	135,0	183,3	316,7	306,7	333,3	360,0
	650	10,5	»	»	15,3	21,1	35,2	31,4	38,5	40,8	181,7	235,0	320,0	340,0	390,0	430,0
	800	11,0	1,005	2,19	21,2	31,0	37,1	50,0	50,2	»	200,0	283,3	416,0	463,3	576,7	»
	1000	11,0	1,090	2,23	24,6	28,8	46,5	53,1	56,6	»	226,7	303,3	483,3	533,3	593,3	»
Ciment n° 2	150	9,0	0,865	»	1,9	2,7	4,9	5,2	7,6	8,2	18,7	28,7	35,7	40,3	52,0	35,3
Poids du litre : 1310	250	10,0	0,865	»	9,0	10,1	14,9	14,7	15,4	14,1	45,3	82,0	121,7	115,0	125,0	138,3
Résidu : tamis de 900m : 6	350	10,5	0,875	»	9,8	16,5	23,7	20,0	24,0	24,2	73,3	136,7	210,0	206,7	216,7	231,7
» » 4900m : 30	450	10,5	0,885	»	16,4	27,7	30,6	28,2	32,5	31,5	107,3	216,7	283,3	310,0	323,3	310,0
	550	11,0	0,900	»	17,7	32,5	34,5	34,5	39,2	40,5	148,3	260,0	393,3	400,0	426,7	453,0
	650	11,0	0,925	»	24,6	38,8	41,8	39,2	43,4	45,2	185,0	353,3	410,0	426,7	456,7	503,3
	800	11,0	0,995	2,25	25,9	38,7	50,2	56,7	55,2	»	236,7	353,3	546,0	553,3	613,3	»
	1000	11,0	1,085	2,25	31,2	39,5	54,0	63,9	57,4	»	233,3	357,0	540,0	620,0	646,7	»
Ciment n° 3	150	9,5	0,835	1,81	2,4	3,5	8,6	12,0	12,2	11,3	25,3	30,3	42,0	55,0	60,0	»
Poids du litre : 1300	250	10,0	0,850	1,83	4,2	7,2	14,9	20,4	22,0	18,3	60,3	85,0	128,3	165,0	175,0	»
Résidu : tamis de 900m : 0	350	10,5	0,850	2,00	10,6	18,4	33,2	32,2	34,5	33,5	115,0	156,7	143,3	313,0	340,0	»
» » 4900m : 10	450	10,5	0,850	2,00	19,2	28,9	40,2	45,1	47,0	44,0	195,0	230,0	416,7	420,0	500,0	»
	550	11,0	0,895	2,21	24,5	36,2	54,8	55,2	58,5	50,0	181,7	283,3	520,0	590,0	625,0	»
	650	11,0	0,940	2,21	28,1	43,0	49,5	56,7	60,7	54,0	275,0	343,3	525,0	580,0	625,0	»
	800	11,5	1,010	2,23	33,7	47,4	57,7	64,0	65,9	66,9	260,0	416,7	603,3	633,3	656,7	»
	1000	11,5	1,100	2,22	29,7	47,5	57,0	65,6	68,0	68,4	283,3	420,0	600,0	723,3	680,0	»

Deuxième série : Sable normal. Mortiers comprimés et non comprimés. Conservés dans l'eau et à l'air.

Désignation des ciments	Dosage du ciment pour 1m³. de sable (en kilogrammes)	Quantité d'eau de gâchage pour 100 k. de mortier) (en litres)	Volume du mortier (en m³)	Densités des éprouvettes	Résistance par centimètre carré — Mortiers conservés dans l'eau — 7 jours	28 jours	3 mois	1 an	Mortiers conservés à l'air — 7 jours	28 jours	3 mois	1 an	Observations
					k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	k.	
Ciment n° 4 Poids du litre : 1 300 Résidu au tamis de 324 : 0 — 900 : 4 — 4 900 : 32	350 (416)	10	0,840	2,09	13,6 **101,7**	19,4 **150,0**	23,7 **198,3**	27,0 **226,7**	15,2 **128,3**	26,1 **205,0**	42,1 **240,0**	54,9 **300,0**	Mortiers comprimés fortement dans les moules.
	650 (718)	9,8	0,905	2,29	33,5 **216,7**	33,9 **310,0**	40,2 **363,3**	46,6 **386,7**	30,1 **270,0**	42,9 **363,3**	53,5 **426,7**	62,0 **570,0**	
	1000 (952)	9,0	1,050	2,31	36,5 **300,0**	38,4 **353,3**	49,1 **410,0**	58,7 **493,3**	35,0 **386,7**	49,7 **500,0**	57,7 **536,7**	62,1 **660,0**	
	1300 (1092)	9,5	1,190	2,32	38,9 **320,0**	42,4 **406,7**	52,2 **430,0**	57,1 **566,7**	39,2 **410,0**	54,0 **560,0**	63,7 **640,0**	60,2 **710,0**	
	350 (393)	12	0,890	2,01	9,6 **65,0**	15,7 **105,0**	19,4 **125,0**	24,7 **168,3**	12,1 **75,0**	24,0 **125,0**	33,2 **155,0**	48,1 **200,0**	Mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier. Léger tassement dans les moules.
	650 (681)	12	0,955	2,20	25,6 **151,3**	32,4 **295,0**	34,0 **271,7**	41,7 **326,7**	21,5 **161,7**	32,9 **245,0**	47,4 **283,3**	51,0 **340,0**	
	1000 (893)	12	1,120	2,24	31,0 **216,7**	32,7 **286,7**	41,6 **343,3**	51,2 **426,7**	32,0 **236,7**	46,4 **360,0**	53,1 **436,7**	61,6 **496,7**	
	1300 (1032)	12,7	1,260	2,25	34,6 **246,7**	33,1 **336,7**	45,5 **373,3**	57,4 **450,0**	43,1 **266,7**	46,2 **396,7**	50,1 **500,0**	62,9 **560,0**	
Ciment n° 5 Poids du litre : 1 000 Résidu au tamis de 324 : 0 — 900 : 1 — 4 900 : 18	350 (427)	10	0,820	2,15	17,5 **126,7**	25,7 **165,0**	32,5 **203,3**	38,9 **260,0**	14,9 **108,3**	20,5 **181,7**	37,2 **216,7**	56,0 **263,3**	Mortiers comprimés.
	650 (699)	10,2	0,930	2,28	35,2 **256,7**	39,0 **330,0**	55,9 **396,7**	55,9 **556,7**	31,4 **268,3**	44,1 **350,0**	59,0 **400,0**	60,0 **453,3**	
	1000 (905)	11,0	1,105	2,26	31,9 **283,3**	40,2 **356,7**	45,7 **426,7**	53,5 **523,3**	37,2 **283,3**	47,5 **396,7**	54,4 **450,0**	64,0 **553,3**	
	1300 (.036)	12,0	1,225	2,25	31,4 **290,0**	40,6 **366,7**	46,2 **403,3**	56,3 **563,3**	40,0 **323,3**	51,4 **413,3**	61,7 **490,0**	57,9 **603,3**	
	350 (393)	12	0,890	2,04	11,1 **78,3**	14,5 **105,0**	23,7 **140,0**	27,7 **173,3**	9,9 **58,3**	18,2 **95,0**	32,7 **150,0**	51,0 **250,0**	Mortiers gâchés à la consistance ordinaire du chantier.
	650 (673)	12,3	0,965	2,20	23,6 **178,3**	33,2 **258,3**	43,9 **320,0**	50,1 **403,0**	22,1 **166,7**	34,2 **255,0**	52,4 **310,0**	56,6 **370,0**	
	1000 (862)	13,5	1,160	2,21	27,2 **233,3**	31,0 **283,3**	47,2 **360,0**	53,5 **500,0**	26,3 **236,3**	43,2 **310,0**	56,1 **416,7**	60,2 **480,0**	
	1300 (963)	15,7	1,350	2,18	29,9 **233,3**	36,7 **306,7**	46,1 **386,7**	52,1 **480,0**	26,2 **230,0**	44,3 **330,0**	57,7 **420,0**	57,6 **540,0**	

NOTA. — Les chiffres imprimés en *caractères ordinaires* indiquent les résistances à la traction et les *caractères gras* les résistances à la compression.
Les chiffres de la deuxième colonne mis entre parenthèses indiquent les quantités de ciment qui entrent dans un mètre cube de mortier mis en place.

Expériences faites s[illegible]

Composition du mortier. Quantité de ciment mélangé avec 1 m³ de sable (1300k)	Dosage du béton	Quantités de ciment, de sable et de cailloux employés dans l'expérience	Première série : Bétons confectionnés avec des cailloux roulés — Quantité d'eau de gâchage	Volume de béton obtenu	Quantité de ciment existant dans 1 m3 de béton	Densité du béton après la prise	Résistance par c. c. à la compress[ion] — 7 jours	28 jours	6 mois	1 an
250	1 volume de mortier pour 1,5 volume de cailloux	Ciment. 250 k. / Sable ... 1 m³ } 0m³,850 Cailloux 1, 275	l. 180	m³ 1,650	kg. 151,5	2,32	kg. 72,5	kg. 97,5	kg. 90,0	[illegible]
450		Ciment. 450 k. / Sable ... 1 m³ } 0, 880 Cailloux 1, 320	210	1,730	260	2,36	102,5	172,5	181,6	[illegible]
650		Ciment. 450 k. / Sable ... 1 m³ } 0, 960 Cailloux 1, 440	242	1,840	353	2,41	162,5	217,5	245,0	[illegible]
1 000		Ciment. 1000 k. / Sable ... 1 m³ } 1, 170 Cailloux 1, 755	305	2,210	448	2,40	185,0	240,0	251,6	[illegible]
250	1 volume de mortier pour 2 volumes de cailloux	Ciment. 250 k. / Sable ... 1 m³ } 0, 850 Cailloux 1, 700	180	1,920	130	2,28	52,5	65,0	72,5	[illegible]
450		Ciment. 450 k. / Sable ... 1 m³ } 1, 880 Cailloux 1, 760	210	2,000	225	2,33	122,5	140,0	178,3	[illegible]
650		Ciment. 650 k. / Sable ... 1 m³ } 0, 960 Cailloux 1, 920	254	2,090	311	2,39	152,5	215,0	248,3	[illegible]
1 000		Ciment. 1000 k. / Sable ... 1 m³ } 1, 170 Cailloux 2, 340	305	2,580	388	2,41	207,5	252,5	285,0	[illegible]
250	1 volume de mortier pour 2,5 volumes de cailloux	Ciment. 250 k. / Sable ... 1 m³ } 0, 850 Cailloux 2, 125	180	2,250	111	2,26	47,5	65,0	75,8	[illegible]
450		Ciment. 450 k. / Sable ... 1 m³ } 0, 880 Cailloux 2, 200	210	2,400	187,5	2,28	72,5	105,0	106,7	[illegible]
650		Ciment. 650 k. / Sable ... 1 m³ } 0, 960 Cailloux 2, 170	254	2,560	254	2,33	87,5	140,0	186,6	[illegible]
1 000		Ciment. 1000 k. / Sable ... 1 m³ } 1, 170 Cailloux 2, 295	320	3,020	331	3,39	172,5	180,0	233,3	316

es bétons à divers dosages

Quantité d'eau de gâchage	Volume de béton obtenu	Quantité de ciment existant dans 1m³ de béton	Densité du béton après la prise	Résistance par c. c. à la compression				Observations
				7 jours	28 jours	6 mois	1 an	
l.	m³	kg.		kg.	kg.	kg.	kg.	
180	1,550	161	2,28	92,5	112,5	115,0	136,6	Les cailloux roulés pesaient au mètre cube 1,550 kilogrammes et le volume du vide s'élevait à 0,400 m³.
210	1,610	279	2,37	157,5	200,0	233,3	246,6	Les pierres cassées pesaient au mètre cube 1,370 kilogrammes et le volume du vide s'élevait à 0,474 m³.
242	1,730	375	2,40	200,0	245,0	343,3	353,3	Pour tous les essais on a employé le même sable; ce sable avait été passé au tamis n° 12, il pesait au mètre cube 1,300 kilogrammes.
305	2,040	490	2,43	280,0	302,5	325,0	420,0	
180	1,800	139	2,28	92,5	97,5	105,0	118,3	
210	1,900	236	2,35	147,5	157,5	200,0	225,0	
242	2,000	325	2,38	160,0	240,0	255,0	370,0	
305	2,440	409	2,42	250,0	280,0	305,0	391,7	
180	2,000	125	2,30	90,0	92,5	80,0	125,0	
210	2,230	202	2,28	105,0	125,0	165,0	198,3	
254	2,420	268	2,34	155,0	177,5	208,3	225,0	
305	2,900	344	2,35	180,0	225,0	248,3	276,7	

Deuxième série : Bétons confectionnés avec des pierres cassées

GRAPHIQUE N° 19

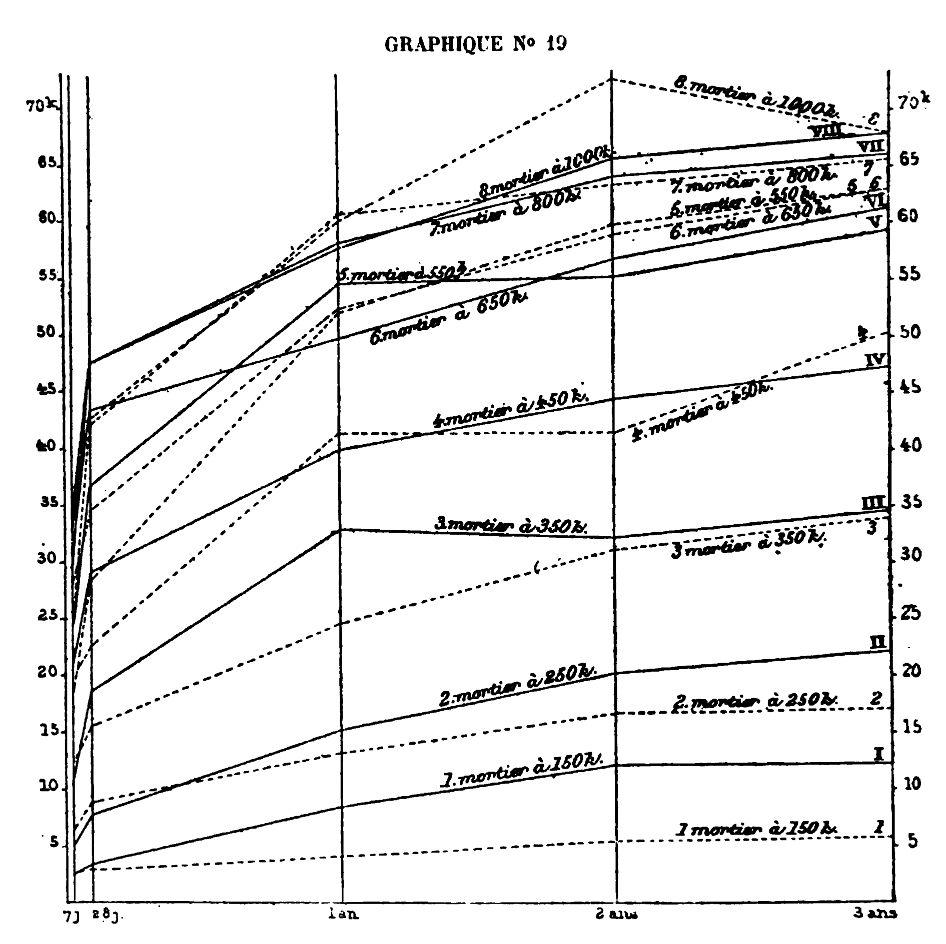


Tableau n° 23. — Mortiers à différents dosages. Ciment n° 3 Sable normal. Mortiers comprimés.
(Les chiffres des résistances à l'écrasement ont été divisés par 10).

Traction ——— Ecrasement - - - - - -

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

VICAT. — *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*, Paris, 1818.

— *Résumé des connaissances positives actuelles sur les qualités, le choix et la convenance réciproque des matériaux propres à la fabrication des mortiers et ciments calcaires*, Paris, 1828.

— *Nouvelles études sur les pouzzolanes artificielles comparées à la pouzzolane d'Italie, dans leur emploi en eau douce et en eau de mer*, Paris, 1846.

— *Recherches statistiques sur les substances calcaires à chaux hydrauliques et à ciments naturels*, Paris, 1853.

— *Recherches sur les causes chimiques de la destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer et sur les moyens d'apprécier leur résistance à cette action*, Paris, 1857 et 1858.

— *Pouzzolanes artificielles* (An. P. C., 1842).

LEBLANC. — *Etude sur le ciment Portland* (An. P. C., 1865).

CHATONEY et RIVOT. — *Considérations générales sur les matériaux employés dans les constructions à la mer* (An. M., 1856).

GRANT. — *Portland cement ; its nature, tests and uses. Minutes of proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, 1880.

FAÏJA. — *Portland cement for users*, London, 1884.

BRULL. — *Etude sur les qualités du ciment de Portland* (An. C[on] 1881-1882).

BARREAU. — *Etude sur les ciments Portland* (An. P. C., 1882).

BONNAMI. — *Fabrication et contrôle des chaux hydrauliques et des ciments*, Paris, Gauthier-Villars, 1888.

DURAND-CLAYE. — *Chimie appliquée à l'art de l'Ingénieur*, Paris, Baudry et C[ie], 1885.

— *Mémoire sur les procédés d'essai de la résistance des pierres, ciments et autres matériaux de construction* (An. P. C., 1888).

DURAND-CLAYE et DEBRAY. — *Etude sur les ciments magnésiens* (An. P. C., 1886).

— *Etude sur la dilatation des pâtes de ciment* (An. P. C., 1888).

DEBRAY. — *Notes sur les conférences de Munich, Dresde et Berlin*, Paris, 1891.

DUQUESNAY. — *Calcaires, chaux, ciments, mortiers*. Encycl. chimique, 1883.

ALEXANDRE. — *Etude sur la résistance des mortiers de ciment* (An. P. C., 1888).

— *Recherches expérimentales sur les mortiers hydrauliques* (An. P. C., 1890).

CANDLOT. — *Etude pratique sur le ciment de Portland*, Paris, 1886.

CANDLOT. — *Mémoire sur les ciments et produits hydrauliques* (Société Enc., 1890).

— *L'Industrie des chaux hydrauliques et des ciments* (Revue générale des Sciences, avril 1895.

— *Revue de l'industrie des chaux et des ciments* (Société Enc., décembre 1895).

— *Action de l'eau de mer sur les mortiers* (Journal « le Ciment », 1897).

A. GOBIN. — *Etude sur la fabrication des chaux hydrauliques dans le bassin du Rhône* (An. P. C., 1887).

— *Note sur les ciments de l'Isère* (An. P. C., 1889).

A. PROST. — *Note sur la fabrication et les propriétés du ciment de laitier* (An. M., 1889).

E. CAMERMAN. — *Les ciments Portland et les ciments de laitier*, Gand, 1892.

R. FERET. — *Note sur diverses expériences concernant les ciments* (An. P. C., 1890).

— *Sur la compacité des mortiers hydrauliques* (An. P. C., 1892).

A. AMLORIO. — *Cementi Italiani*, V. Hoepli, Milan, 1893.

J. FORREST. — *Concrete as applied in the construction of harbours*, London, 1886.

— *Portland cement concrete*, London, 1891.

BAMBER AND CAREY ON *Portland cement, and Smith on Portland cement concrete*, London, 1892.

CASTANHEIRA DAS NEVES. — *Estudos sobre cimentos nacionaes*, 1891.

— *Estudos sobre algumas caes hydraulicas e magnesianas nacionaes*, 1892.

— *Estudos sobre resistencia de materiaes*, 1892.

— *Estudos sobre cimentos estrangeros importados em Portugal*, 1894 ; *Revista de obras publicas e minas, Lisboa.*

DEBAUVE. — *Procédés et matériaux de construction* (nouveau tirage), Paris, Dunod, 1894.

Dr W. MICHAELIS. — *Résistance des matériaux hydrauliques à la mer*, Bruxelles, 1896.

LE CHATELIER H. — *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*, Paris, Dunod, 1887.

— *Procédés d'essai des matériaux hydrauliques* (An. M., 1893).

A. MAHIELS. – *Le béton et son emploi*, Liège, Paris, Baudry, 1893.

DENFER. — *Maçonnerie. Encyclop. travaux Publics*, Baudry, 1895.

Association des fabricants de ciment Portland allemands. — *Der Portland Cement und Seine Anwendungen im Bauwesen*, Berlin, 1892.

GRANGE. — *Chaux et sels de chaux*, Paris, Baudry, 1894.

P. PLANAT. — *Recherches sur la théorie des ciments armés*, Paris, 1894.

E. COIGNET et DE TÉDESCO. — *Du calcul des ouvrages en ciment avec ossature métallique* (Société des Ing. civils, mars 1894).

C. BERGER. — *Les constructions en fer et ciment*, Paris, Berger-Levrault, 1896.

C. SCHOCH. — *Die moderne aufbereitung und wertung der mortel materialen*, Berlin, 1896.

DURAND-CLAYE, DEROME et R. FERET. — *Chimie appliquée à l'art de l'Ingénieur*, Paris, Baudry, 1897.

P. DAUBRESSE. — *De l'emploi des Ciments Portland dans les constructions civiles et industrielles*. Bruxelles, 1897.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER

CHAUX HYDRAULIQUES

CHAPITRE II

CIMENTS ARTIFICIELS

I. — *Ciments Portland.*

II. — *Ciments de laitier.*

CHAPITRE III

CIMENTS NATURELS. — CIMENTS MIXTES. — CIMENTS DE GRAPPIERS. — CIMENTS PROMPTS.
CIMENTS ROMAINS. — POUZZOLANE. — TRASS

CHAPITRE IV

ESSAIS DES PRODUITS HYDRAULIQUES

CHAPITRE V

EMPLOI DES PRODUITS HYDRAULIQUES

CHAPITRE VI

CAUSE DE DESTRUCTION DES MORTIERS

CHAPITRE VII

ANNEXE I

INFLUENCE DU CHLORURE DE CALCIUM ET DU SULFATE DE CHAUX SUR LA PRISE ET LE DURCISSEMENT DES MORTIERS

ANNEXE II

ANNEXE III

ANNEXE IV

ANNEXE V

ANNEXE VI

ANNEXE VII

CATALOGUE DE LIVRES

SUR LA

CONSTRUCTION ET LES TRAVAUX PUBLICS

PUBLIÉS PAR

LA LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET Cie

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

Le catalogue est envoyé franco sur demande.

Annales de la construction.

Nouvelles Annales de la construction, fondées par OPPERMANN. — 12 livraisons par an, formant 1 beau volume de 50 à 60 planches et 200 colonnes de texte.

Abonnements : Paris, 15 fr. — Départements et Belgique, 18 fr. — Union postale, 20 fr.

Prix de l'année parue, reliée, 20 fr.

Table des matières des années 1876 à 1887, 1 brochure in-12. . . . . 50 c.

Agenda Oppermann.

Agenda Oppermann paraissant chaque année. Elégant carnet de poche contenant tous les chiffres et tous les renseignements techniques d'un usage journalier. Rapporteur d'angles, coupe géologique du globe terrestre, guide du métreur. — Résumé de géodésie. — Poids et mesures, monnaies françaises et étrangères. — Renseignements mathématiques et géométriques. — Renseignements physiques et chimiques. — Résistance des matériaux. — Electricité. — Règlements administratifs. Dimensions du commerce. — Prix courants et séries de prix. — Tarifs des Postes et Télégraphes.

Relié en toile, 3 fr. ; en cuir, 5 fr. — Pour l'envoi par la poste, 25 c. en plus.

Aide-mémoire de l'ingénieur.

Aide-mémoire de l'ingénieur. Mathématiques, mécanique, physique et chimie, résistance des matériaux, statique des constructions, éléments des machines, machines motrices, constructions navales, chemins de fer, machines-outils, machines élévatoires, technologie, métallurgie du fer, constructions civiles, législation industrielle. Troisième édition française du Manuel de la Société « Hütte » par PHILIPPE HUGUENIN, 1 volume in-12 contenant plus de 1 200 pages, avec 500 figures dans le texte, solidement relié en maroquin . . . . 15 fr.

Aide-mémoire des conducteurs des ponts et chaussées.

Aide-mémoire des conducteurs et commis des Ponts et Chaussées, agents voyers, chefs de section, conducteurs et piqueurs des chemins de fer, contrôleurs des mines, adjoints du génie, entrepreneurs et, en général, de toute personne s'occupant de travaux, par EUG. PETIT, conducteur des Ponts et Chaussées, 1 volume in-12, avec de nombreuses figures dans le texte, solidement relié en maroquin . . . . 15 fr.

Traité de constructions civiles.

Traité de constructions civiles. Fondations, maçonnerie, pavages et revêtements, marbrerie, vitrerie, charpente en bois et en fer, couverture, menuiserie et ferrures, escaliers, monte-plats, monte-charges et ascenseurs, plomberie d'eau et sanitaire, chauffage et ventilation, décoration, éclairage au gaz et à l'électricité, acoustique, matériaux de construction, résistance des matériaux, renseignements généraux, par E. BARBEROT, architecte. 1 volume in-8°, avec 1554 figures dans le texte dessinées par l'auteur Relié . . . . 20 fr.

Cours de construction.

Cours pratique de construction, rédigé conformément au programme officiel des connaissances pratiques exigées pour devenir ingénieur, par PRUD'HOMME.

Terrassements, — ouvrages d'art, — conduite des travaux, — matériel, — fondations, — dragage, — mortiers et bétons, — maçonnerie. — bois, — métaux, — peinture, jaugeage des eaux, — règlement des usines, etc. 4° édition. 2 volumes in-8°, avec 363 figures dans le texte . . . . . 16 fr.

Maçonnerie.

Architecture et constructions civiles. Maçonnerie ; pierres et briques ; leur emploi dans les maçonneries ; proportion des murs ; fondations ; murs de cave et murs en élévation ; des moulures et des

ordres ; décoration des murs extérieurs des édifices ; cloisons, planchers, voûtes ; escaliers en maçonnerie ; éléments de décoration intérieure ; revêtement des sols ; roches naturelles ; chaux et ciments ; du plâtre, produits céramiques, par J. DENFER, architecte, professeur à l'École centrale, 2 volumes grand in-8°, avec 794 figures dans le texte . . . . 40 fr.

Charpente en bois et menuiserie.

Architecture et constructions civiles. Charpente en bois et menuiserie ; les bois, leurs assemblages ; résistance des bois ; tableaux, calculs faits ; linteaux et planchers ; pans de bois ; combles ; étaiements, échafaudages, appareils de levage ; travaux hydrauliques, cintres, ponts et passerelles en bois ; escaliers ; menuiserie en bois ; parquets, lambris, portes, croisées, persiennes, devantures, décoration, par J. DENFER, architecte, professeur à l'École centrale. 1 volume grand in-8°, avec 680 figures dans le texte . . . . 25 fr.

Terrassements, tunnels, etc.

Procédés généraux de construction. Travaux de terrassement, tunnels, dragages et dérochements, par ERNEST PONTZEN, 1 volume grand in-8°, avec 234 figures dans le texte . . . . . . 25 fr.

Mesurage et métrage.

Traité pratique et complet de tous les mesurages, métrages, jaugeages de tous les corps, appliqué aux arts, aux métiers, à l'industrie, aux constructions, aux travaux hydrauliques, aux nivellements pour construction de routes, de canaux et de chemins de fer, drainage, etc., enfin à la rédaction de projets de toute espèce de travaux du ressort de l'architecture et du génie civil et militaire, terminé par une analyse et série de prix avec détails sur la nature, la qualité, la façon et la mise en œuvre des matériaux, par E. SERGENT, 8e édition, 2 volumes grand in-8° et 1 atlas de 47 planches in-folio . . . . 50 fr.

Coupe des pierres.

Traité pratique de la coupe des pierres, précédé de toute la partie de la géométrie descriptive qui trouve son application dans la coupe des pierres, par LEJEUNE. 1 volume in-8° et 1 atlas in-4° de 50 planches, contenant 381 figures . . . . 40 fr.

Coupe des pierres.

Coupe des pierres, précédée des principes du trait de stéréotomie, par EUGÈNE ROUCHÉ, examinateur de sortie à l'École Polytechnique, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, et CHARLES BRISSE, professeur à l'École centrale et à l'École des Beaux-Arts, répétiteur à l'École Polytechnique. 1 volume grand in-8° et un atlas in-4° de 33 planches . . . . 25 fr.

Matériaux de construction.

Connaissance, recherche et essais des matériaux de construction et de ballastage, par EM. BAUDSON, chef de section des travaux neufs au chemin de fer du Nord. 1 volume grand in-8° . . . . 6 fr.

Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur.

Chimie appliquée à l'art de l'ingénieur. *Première partie* : Analyse chimique des matériaux de construction, par CH. LÉON DURAND-CLAYE, inspecteur général, ancien professeur et ancien directeur du Laboratoire à l'École des Ponts et Chaussées, et DERÔME, chimiste de ce Laboratoire. *Seconde partie* : Étude spéciale des matériaux, d'agrégation des matériaux, par RENÉ FERET, ancien élève de l'École Polytechnique, chef du Laboratoire des Ponts et Chaussées à Boulogne-sur-Mer. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte. . . . . 15 fr.

Chaux et sels de chaux.

Chaux et sels de chaux appliqués à l'art de l'ingénieur, par GRANGE, agent voyer en chef du département de la Vienne. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . 18 fr.

Carrières de pierre de taille.

Recherches statistiques et expériences sur les matériaux de construction. Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889, publié par le MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS et contenant pour chaque carrière : sa désignation et le nom de la commune où elle est située, le mode d'exploitation, le nombre et la hauteur des bancs, la désignation usuelle de la pierre, la nature de la pierre, la position géologique de la carrière, le poids moyen par mètre cube et la résistance à l'écrasement par centimètre carré des échantillons essayés. 1 volume in-4° . . . . 10 fr.

Congrès des procédés de construction.

Congrès international des procédés de construction tenu en 1889 sous la présidence de M. Eiffel. Comptes rendus des séances et visites du Congrès, par AUGUSTE MOREAU et GEORGES PETIT, secrétaires du Congrès, 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte et 8 planches. 15 fr

Murs de soutènement.

Études théoriques et pratiques sur les murs de soutènement et les ponts et viaducs en maçonnerie,

par DUBOSQUE, sous-ingénieur des Ponts et Chaussées, ancien chef de bureau des travaux neufs à la Compagnie du Nord. 5e édition, revue, corrigée et augmentée. 1 volume grand in-8e, avec 15 planches et 141 figures, relié . . . . 15 fr.

Consolidations des talus.

Traité de consolidation des talus, routes, canaux et chemins de fer, par R. BRUÈRE, ingénieur civil. 1 vol. in-12 et atlas in-8e de 25 pl. doubles . . . . 10 fr.

Statique graphique.

Éléments de statique graphique, par EUGÈNE ROUCHÉ, examinateur de sortie à l'École Polytechnique, professeur de statique graphique au Conservatoire des arts et métiers. 1 volume grand in-8e avec de nombreuses gravures dans le texte. . . . . 12 fr. 50

Statique graphique.

Applications de la statique graphique. Charges des ponts et des charpentes, poutres droite, courbes, pleines, à treillis, continues; arcs métalliques; fermes métalliques; piles métalliques; influence du vent sur les constructions; déformations; calcul des poutres pour le lançage et le montage; piles en maçonnerie; calcul des joints des poutres; formules et tables usuelles, par KŒCHLIN, ingénieur de la maison Eiffel. 1 volume grand in-8e et 1 atlas de 30 planches . . . . 30 fr.

Statique graphique.

Éléments de statique graphique appliquée aux constructions. 1re *partie* : Poutres droites, poussée des terres, voûtes, par MULLER-BRESLAU (traduction par SEYRIG). 2e *partie* : Poutres continues, applications numériques, par SEYRIG, ingénieur-constructeur du pont du Douro. 1 volume grand in-8e et un atlas in-4e de 29 planches en 3 couleurs . . . . 20 fr.

Statique graphique.

Traité de statique graphique appliquée aux constructions, toitures, planchers, poutres, ponts, etc. — Éléments du calcul graphique; des forces et de leur résultante, des moments fléchissants, des efforts tranchants, recherche des maxima, charge permanente. surcharge uniformément répartie, surcharge mobile, données pratiques sur le poids propre des toitures et sur leur surcharge accidentelle, poutres pleines, poutres à treillis simples et multiples, centre de gravité, moment d'inertie, exemples et applications, par MAURICE MAURER, 2e édition. 1 volume grand-8e, avec figures dans le texte et 1 atlas de 20 planches in-4e . . . . 12 fr. 50

Cours de mathématiques.

Cours de mathématiques pures et appliquées, à l'usage des conducteurs des Ponts et Chaussées, agents-voyers, chefs de section, architectes, conducteurs de travaux, entrepreneurs, etc., comprenant *Arithmétique*, nombres entiers, fractions et nombres fractionnaires, progression, séries et logarithmes, applications. *Géométrie plane* : propriétés et tracé des figures planes, mesure et proportion des figures planes, trigonométrie, courbes diverses. *Géométrie de l'espace* : propriétés et construction des figures de l'espace, mesure des figures de l'espace, géométrie descriptive. perspective. *Algèbre, analyse et géométrie analytique. Mécanique* : statique, dynamique, hydrostatique, hydrodynamique, par L. LANCELIN, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume in-8e, avec de nombreuses figures dans le texte, relié . . . . 10 fr.

Résumé des connaissances mathématiques.

Résumé des connaissances mathématiques nécessaires dans la pratique des travaux publics et de la construction, par E. MUSSAT, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8e, avec 132 figures dans le texte. . . . . 10 fr.

Traité de topographie.

Traité de topographie. — Appareils d'optique, applications de la géodésie à la topographie, instruments de mesure, levé des plans de surface, levés souterrains, théorie des erreurs, par ANDRÉ PELLETAN, ingénieur en chef des Mines. 1 volume grand in-8e, avec 235 figures dans le texte. Relié. 15 fr.

Cours de topographie.

Cours de topographie. Levé des plans de surface et des plans de mines, par ALFRED HABETS, ingénieur honoraire des mines, professeur à l'Université de Liège. 2e édition, revue et augmentée, 1 volume grand in-8e, avec 107 figures dans le texte . . . . 8 fr.

Levé des plans et nivellement.

Levé des plans et nivellement. Opérations sur le terrain, opérations souterraines, nivellement de haute précision, par LÉON DURAND-CLAYE, ingénieur en chef des Ponts et Chaussés, PELLETAN et LALLEMAND, ingénieurs des mines. 1 volume grand in-8e, avec figures dans le texte. . . , 25 fr.

Nivellement.

Traité du nivellement, comprenant les principes généraux, la description et l'usage des instruments, les opérations et les applications, par DUPLESSIS. 1 volume in-8e, contenant 112 figures . . . 8 fr.

Tables tachéométriques.

Tables tachéométriques, donnant aussi rapidement que la règle logarithmique tous les calculs nécessaires à l'emploi du tachéomètre, par LOUIS PONS, Ingénieur d'études de chemins de fer. 1 volume in-8°, relié . . . . 10 fr.

Courbes de raccordement.

Nouvelles tables pour le tracé des courbes de raccordement en arc de cercle (chemins de fer, canaux, routes et chemins), par CHAUVAC DE LA PLACE. 5e édition. 1 volume in-12, relié. . . 7 fr. 50

Mouvement des terres.

Théorie et pratique du mouvement des terres d'après le procédé Bruckner, par ERNEST HENRY, inspecteur général des Ponts et Chaussées, 1 vol. gr. in-8°. . . . . 2 fr. 50

Construction des chemins de fer.

Instructions pour la préparation des projets et la surveillance des travaux de construction de la plate-forme des chemins de fer, suivies de tables pour le calcul des courbes et pour l'évaluation des volumes des déblais et des remblais, par L. PARTIOT, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume petit in-4°, avec 8 planches et de nombreuses figures intercalées dans le texte, relié . . 15 fr.

Traité des chemins de fer.

Tracé des chemins de fer, routes, canaux, tramways, etc. Etudes préliminaires, études définitives, recherche et choix des matériaux de construction et de ballastage, par EM. BAUDSON, chef de section des travaux neufs au chemin de fer du Nord. 1 volume grand in-8°, avec quatre planches et 95 figures intercalées dans le texte . . . . 10 fr.

Cours de routes.

Cours de routes professé à l'Ecole des Ponts et Chaussées. Disposition d'une route, étude et réaction des projets, construction, entretien, par CH.-LÉON DURAND-CLAYE, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte. . . . . 20 fr.

Pavage en bois.

Le bois et ses applications au pavage à Paris, en France et à l'étranger. Divers systèmes de pavage en bois ; bois employé au pavage ; étude des propriétés physiques, mécaniques, anatomiques et chimiques des bois ; conservation et préparation des bois ; fabrication des pavés ; entretien et durée des pavages en bois ; pavage en bois dans les voies à tramways ; régime des sociétés de pavage en bois ; contrats et cahiers des charges ; fonctionnement du système de la régie, à Paris ; prix de revient, par ALBERT PETSCHE, ingénieur des Ponts et Chaussées, ancien ingénieur du service municipal de Paris. 1 volume in-8°, avec 223 figures dans le texte, relié . . . . 20 fr.

Traité complet des chemins de fer.

Traité complet des chemins de fer. Historique et organisation financière, construction de la plate-forme, ouvrages d'art, voie, stations, signaux, matériel roulant, traction, exploitation, chemins de fer à voie étroite, tramways, par G. HUMBERT, ingénieur des Ponts et Chaussées. 3 volumes grand in-8°, avec 700 figures dans le texte. . . . . 50 fr.

Chemins de fer. Notions générales et économiques.

Chemins de fer. Notions générales et économiques. Historique, formalités et règlements relatifs à l'exécution des travaux, régimes, développements, dépenses, comparaison des voies ferrées avec les routes et les voies de navigation intérieure, prix de revient des transports sur rails, tarif et leur application, recettes d'exploitation, voie et traction, chemins de fer à voie étroite, considérations économiques, par LÉON LEYGUE, ancien ingénieur des Ponts et Chaussées, ingénieur civil. 1 volume grand in-8° . . . . 15 fr.

Chemins de fer. — Superstructure.

Chemins de fer. Superstructure : voie, gares et stations, signaux, par E. DEHARME, ingénieur du service central de la Compagnie du Midi, professeur du cours de Chemins de fer à l'École centrale des Arts et Manufactures. 1 volume grand in 8°, avec 310 figures dans le texte et 1 atlas in-4° de 73 planches doubles . . . . 50 fr.

Chemins de fer d'intérêt local.

Traité des chemins de fer d'intérêt local. Chemins de fer à voie étroite, tramways, chemins de fer à crémaillère et funiculaires, par H. HUMBERT, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 212 figures dans le texte. Relié. . . . . 20 fr,

Chemins de fer à faible trafic.

Les chemins de fer à faible trafic en France. Lignes secondaires des grands réseaux, chemins de fer d'intérêt local et tramways à vapeur. Etablissement et exploitation, par A. SAMPITÉ, ingénieur des Ponts et Chaussées, sous-chef de l'exploitation des chemins de fer de l'Etat. 1 volume grand in-8° et atlas in-4° de 16 planches . . . . 16 fr.

Chemins de fer à voie de 0,60 centimètres.

Construction et exploitation des chemins de fer à voie de 0,60 centimètres. Voie, terrassements,

ouvrages d'art, machines et matériel roulant, avec étude d'un tracé entre deux points donnés, par R. TARTARY, conducteur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 97 figures dans le texte . . . . 10 fr.

Chemins de fer d'intérêt local et Tramways.

Chemins de fer d'intérêt local et tramways établis sous le régime de la loi du 11 juin 1880. Résumé des résultats obtenus et critique des différents systèmes employés, par H. HEUDE, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 volume in-8° . . . . 3 fr. 50

Chemins de fer funiculaires.

Étude des chemins de fer funiculaires. Historique et classification, étude du profil en long, résistance au mouvement des trains, engins spéciaux et voie, construction et exploitation, par ALPHONSE VAUTIER, ingénieur civil, 1 brochure grand in-8°, avec figures dans le texte. . . . . . 2 fr. 50

Chemins de fer funiculaires. — Transports aériens.

Chemins de fer funiculaires. Transports aériens, par A. LÉVY-LAMBERT, ingénieur civil. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . 15 fr.

Traction mécanique des tramways.

La traction mécanique des tramways ; étude des différents systèmes ; comparaison et prix de revient, par RAYMOND GODFERNAUX, ingénieur des Arts et Manufactures, inspecteur de l'exploitation au chemin de fer du Nord. 1 volume avec 182 figures dans le texte . . . . 20 fr.

Tramways.

Tramways à vapeur à voie de 0m,60, de Pithiviers à Toury. — I. Description du tracé, du matériel fixe et du matériel roulant, détail des dépenses, par F. LIÉVIN, ingénieur des Ponts et Chaussées. — II. Examen critique des résultats obtenus, par H. HEUDE, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec une planche . . . . 2 fr. 50

Tramways à air comprimé.

L'air comprimé appliqué à la traction des tramways. Description de la locomotive, compresseurs, chargement de voitures et canalisation, divers modes de transport par l'air comprimé, prix de revient et conclusions, par L.-A. BARBET. 1 volume grand in-8°, avec 96 figures dans le texte . . . 7 fr. 50

Tramways électriques

Les tramways électriques Dispositions générales ; voie ; tramways à conducteurs aériens, souterrains, établis au niveau du sol ; tramways à accumulateurs ; matériel roulant ; stations centrales ; dépenses, par HENRI MARÉCHAL, ingénieur des Ponts et Chaussées, ingénieur de la 1re section des Travaux de Paris et du Secteur municipal d'électricité. 1 volume in-8°, avec 118 figures dans le texte, relié. 7 fr. 50

Moyens de transport.

Les moyens de transport appliqués dans les mines, les usines et les travaux publics ; voitures, tramways, chemins de fer, plans inclinés, traînage par câble et par chaîne, etc., organisation et matériel, par EVRARD, 2 vol. in-8°, avec 1 atlas de 23 pages in-folio, contenant 1 400 figures. 100 fr.

Montagnes et torrents.

Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement, par E. THIERY, professeur à l'École nationale forestière, avec une introduction, par M. C. LECHALAS. 1 volume grand in-8°, avec 404 figures dans le texte . . . . 15 fr.

Hydraulique agricole.

Hydraulique agricole. Aménagement des eaux ; irrigation des terres labourables, des cultures maraîchères, des jardins, des prairies, etc. ; création et entretien des prairies ; desséchements, dessalage, limonage et colmatage, curage ; irrigation et drainage combinés ; renseignements complémentaires techniques et administratifs, par J. CHARPENTIER DE COSSIGNY, ancien élève de l'École Polytechnique, lauréat de la Société des Agriculteurs de France, ingénieur civil. 2e édition revue et augmentée. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte . . . . 15 fr.

Hydraulique fluviale.

Hydraulique fluviale. Météorologie et hydrologie ; les fleuves, grandes inondations, navigation ; conditions techniques d'un grand développement de la navigation fluviale ; conclusions ; par M. C. LECHALAS, inspecteur général des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . 17 fr. 50

Navigation intérieure.

Guide officiel de la navigation intérieure, avec itinéraires graphiques des principales lignes de navigation et carte générale des voies navigables de la France, dressé par les soins du MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. Documents réglementaires, nomenclature alphabétique et conditions de navigabilité, notices et tableaux des distances, itinéraires des principales lignes de navigation, itinéraires graphiques, carte au 1/1500 000e, 5e édition revue et augmentée. 1 volume in-18 jésus, avec 3 planches en couleur et une carte en couleur de 0m,70 sur 0m,65.

Prix : le volume broché et la carte en feuille . . . . 2 fr. 25

Le volume solidement relié et la carte montée sur toile, pliée et reliée comme le volume. . 5 fr.

Rivières et canaux.

Navigation intérieure. Rivières et canaux, par Guillemain, inspecteur général des Ponts et Chaussées, professeur à l'École des Ponts et Chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec gravures dans le texte . . . . 40 fr.

Réservoirs.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans les *Annales de la Construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

Les réservoirs d'alimentation d'eau de la Ville de Paris, à Montmartre, avec 2 planches. Livraison de février 1890 . . . . 2 fr.

Réservoir métallique de 280 mètres cubes du service des eaux de Paris, avec une planche. Livraison de septembre 1890 . . . . 2 fr.

Réservoir de Torcy-Neuf, pour l'alimentation du canal du Centre, avec 2 planches. Livraison d'avril 1891 . . . . 2 fr.

Réservoirs à pétrole des docks de Saint-Ouen, avec 1 planche. Livraison de juin 1877 . . . 2 fr.

Réservoir de la Ville de Norwood (Ohio). Livraison de mars 1885 . . . . 2 fr.

Réservoir en maçonnerie de 8 000 mètres de capacité, sur le plateau d'Avron, avec une planche. Livraison de janvier 1892 . . . . 2 fr.

Réservoir d'eau à l'hospice Ferrari, à Clamart, avec 1 planche. Livraison de mars 1893. . 2 fr.

Prise d'eau du réservoir de Montaudry (canal du Centre), avec 1 planche. Livraison de juillet 1893 . . . . 2 fr.

Tour hydraulique pour l'alimentation d'eau de la gare de Brême ; avec une planche. Livraison d'octobre 1893 . . . . 2 fr.

Note sur le calcul des fonds de réservoirs soutenus au pourtour et au centre. Livraison de janvier 1894 . . . . 2 fr.

Barrages-réservoirs.

Étude théorique et pratique sur les barrages-réservoirs. Barrages en terre, barrages mixtes, barrages en maçonnerie, rupture des barrages-réservoirs, par A. Dumas, ingénieur des Arts et Manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 107 figures dans le texte . . . . 7 fr. 50

Moyens de franchir les chutes des canaux.

Étude sur les moyens de franchir les chutes des canaux. Écluses, plans inclinés, ascenseurs, ascenseur des Fontinettes, par H. Gruson, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées et L.-A. Barbet, ingénieur en chef de l'usine de Cail. 1 volume grand in-8°, et 1 atlas in-4°, de 28 planches. . 25 fr.

Travaux maritimes.

Travaux maritimes ; phénomènes marins ; accès des ports. Mouvements de la mer. — Régime des côtes. — Matériaux dans l'eau de mer. — Atterrage. Entrée des ports. Jetées, par Laroche, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, professeur à l'École des Ponts et Chaussées. 1 volume in-8° et 1 atlas in-4° de 46 planches doubles . . . . 40 fr.

Ports maritimes.

Ports maritimes. Ports d'échouage. — Bassins à flot. Écluses des bassins à flot. — Portes d'écluses. — Ponts mobiles. — Moyens d'obtenir et d'entretenir la profondeur à l'entrée des ports. — Moyen d'obtenir et d'entretenir la profondeur dans les ports. Ouvrages et appareils pour la réparation des navires. Défense des côtes. Éclairage et balisage des côtes. Exploitation des ports. Canaux maritimes, par F. Laroche, inspecteur général des Ponts et Chaussées, professeur à l'École nationale des Ponts et Chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec figures dans le texte, et 2 atlas in-4° contenant 37 planches doubles . . . . 50 fr.

Cours de ponts.

Cours de ponts de l'École des Ponts et Chaussées. Emplacements, débouchés, fondations, ponts en maçonnerie, par Jean Résal, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. 1 vol. grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte . . . . 14 fr.

Ponts en maçonnerie.

Ponts en maçonnerie, par E. Degrand, inspecteur général des Ponts et Chaussées, et J. Résal, ingénieur des Ponts et Chaussées. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte . . . . 40 fr.

Barème des poutres métalliques.

Barème des poutres métalliques à âmes pleines et à treillis, par Pascal, ingénieur civil. 1 volume in-4°, avec figures dans le texte. Relié. . . . . 12 fr. 50

Constructions métalliques.

Constructions métalliques. — Élasticité et résistance des matériaux : fonte, fer et acier, par Jean

RÉSAL, ingénieur des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte . 20 fr.

Ponts métalliques.

Traité pratique des ponts métalliques ; calcul des poutres et des ponts par la méthode ordinaire et par la statique graphique, par M. PASCAL, ingénieur, ancien élève de l'École d'Arts et Métiers d'Aix. 1 volume grand in-8° et 1 atlas de 12 planches . . . . 12 fr.

Ponts métalliques.

Ponts métalliques, par JEAN RÉSAL, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Tome premier. — Calcul des pièces prismatiques ; renseignements pratiques ; formules usuelles ; poutres droites à travées indépendantes ; ponts suspendus ; ponts en arc. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte . . . . 20 fr.

Tome second. — Poutres à travées solidaires : théorie générale des poutres à section constante ; calcul des poutres symétriques ; poutres continues à section variable ; théorie générale des poutres de hauteur variable ; montage de ponts par encorbellement ; ponts-grues ; calculs des systèmes articulés ; piles métalliques ; tables numériques. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte . . . . 20 fr.

Ponts métalliques.

Calcul des ponts métalliques à poutres droites, à une ou plusieurs travées par la méthode des lignes d'influence. Formules et tables servant au calcul rapide des moments fléchissants et des efforts tranchants maximums déterminés, en divers points des poutres, par des charges uniformément réparties et des charges concentrées mobiles, par ADRIEN CART et LÉON PORTES, ingénieurs civils attachés au service des ponts métalliques de la Compagnie d'Orléans. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte et 2 planches, relié. . . . . 20 fr.

Ponts et viaducs métalliques.

Calculs de résistance des ponts et viaducs métalliques à poutres droites, d'après la circulaire ministérielle du 29 août 1891, par MAURICE HULEWICZ, ingénieur, ancien élève de l'École des Ponts et Chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 1 planche . . . . 10 fr.

Ponts métalliques.

Calculs des ponts métalliques à une ou plusieurs travées. Charges mobiles et applications pratiques d'après l'ordonnance pour la construction des ponts du ministère I. R. du Commerce de l'Empire d'Autriche, en date du 15 septembre 1887, avec commentaires à l'appui et tables numériques publiés par le rapporteur MAXIMILIEN DE LEBER, inspecteur au corps I. R. du contrôle des chemins de fer, ancien élève de l'École des Ponts et Chaussées de Paris. Édition française, avec une introduction et des notes, par CHARLES BRICKA, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, ingénieur en chef de la voie et des bâtiments aux chemins de fer de l'État. 2 vol. grand in-8° avec figures et planches, cartonné . . . . 30 fr.

Ponts métalliques.

Études théoriques et pratiques sur les ponts métalliques à une travée et à poutre droites et pleines ; par E. DUMITZ, commis des Ponts et Chaussées, attaché au service vicinal du Pas-de-Calais. 1 volume grand in-8°, avec 147 figures dans le texte. . . . . 10 fr.

Ponts métalliques.

Ponts métalliques à travées continues. Méthode de calcul satisfaisant aux nouvelles prescriptions du règlement ministériel du 29 août 1891, avec tables numériques pour en faciliter l'emploi, par BERTRAND DE FONTVIOLANT, ingénieur à la Compagnie de Fives-Lille, répétiteur de mécanique appliquée à l'École centrale. 1 volume grand in-8°, avec 3 planches . . . . 10 fr.

Stabilité des constructions.

Traité de stabilité des constructions, précédé d'éléments de statique graphique et suivi de compléments de mathématiques. Leçons professées au Conservatoire national des Arts et Métiers et à l'École centrale d'Architecture, par JULES PILLET, professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, à l'École nationale des Beaux-Arts, etc. 1 volume grand in-4° de 536 pages imprimé sur très beau papier. Nombreux tableaux graphiques ; abaques et tables numériques ; 660 figures et épures dans le texte. . . 25 fr.

Résistance des matériaux.

Stabilité des constructions et résistance des matériaux, par A. FLAMANT, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, professeur à l'École des Ponts et Chaussées et à l'École centrale. 1 volume grand in-8°, avec 264 figures dans le texte. 25 fr.

Moments d'inertie.

Carnet du Constructeur. Recueil de moments d'inertie relatifs à 3 263 poutres composées à âme simple et double d'une hauteur variant de 20 centimètres à 1 mètre, par CHEVALIER et BRUN, ingénieurs constructeurs. 1 volume in-12. Relié . . . . 7 fr. 50

ST-AMAND (CHER). — IMPRIMERIE SCIENTIFIQUE ET LITTÉRAIRE, BUSSIÈRE FRÈRES

